
住友重機械 技報

SUMITOMO HEAVY INDUSTRIES
TECHNICAL REVIEW

産業車両特集

Special Issue for Industrial Vehicles

住友重機械技報 No. 196 2018

産業車両特集

論文・報告	フィールドビューモニター2の開発 —単眼カメラの画像認識による油圧ショベルの周辺確認サポート機能—	清田芳永, 大槻俊介, 相澤 晋, 李 丹亭	1
技術解説	ICT施工対応油圧ショベル SH200-7 MG・MC仕様	泉川岳哉	7
	ホイール式アスファルトフィニッシャー HA60W-10	馬場信行	11
	350tづりクローラクレーン SCX3500-3	星野浩之	13
	バッテリー式フォークリフトの巡回速度制御	鈴木雄士	17

論文・報告

	非平衡分子動力学法による超音速ノズル流と凝集の解析	松村裕也	19
	STAF (Steel Tube Air Forming) プロセスの開発	石塚正之, 清水 慧	23

Special Issue for Industrial Vehicles

T/PAPERS	Development of Field View Monitor 2	1
	—Assisting function for safety check around hydraulic excavator using real-time image recognition with monocular cameras— Yoshihisa KIYOTA, Shunsuke OTSUKI, Susumu AIZAWA, Danting LI	
T/INVITATIONS	Hydraulic Excavator for ICT Construction SH200-7 MG/MC	7
	Wheeled Paver HA60W-10	11
	Crawler Crane SCX3500-3	13
	Safety Turn Control of Battery Forklift	17

T / PAPERS

	Supersonic Nozzle Flow and Condensation Analysis by Non-equilibrium Molecular Dynamics	19
	Yuya MATSUMURA	
	Development of STAF(Steel Tube Air Forming) Process	23
	Masayuki ISHIZUKA, Satoshi SHIMIZU	

Special Issue for Industrial Vehicles

産業車両特集



フィールドビューモニター2の開発

—単眼カメラの画像認識による油圧ショベルの周辺確認サポート機能—

Development of Field View Monitor 2

—Assisting function for safety check around hydraulic excavator using real-time image recognition with monocular cameras—

●清田 芳永* 大槻 俊介* 相澤 晋* 李 丹亭*
Yoshihisa KIYOTA Shunsuke OTSUKI Susumu AIZAWA Danting LI



油圧ショベルのフィールドビューモニター2
Field View Monitor 2 on hydraulic excavator

油圧ショベルに搭載した3台の単眼カメラの画像をリアルタイムで認識し、人らしい像があればモニタ表示と音で知らせるフィールドビューモニター（FVM：Field View Monitor）2を開発した。すでに、標準装備のFVMは3台の単眼カメラの画像をリアルタイムに合成してモニタ表示し、油圧ショベルの後方270°をひと目で確認できる機能であり、直感的な分かりやすさやNETIS VE登録により好評を得た。画像認識機能の追加により、オペレータにモニタ確認のきっかけを与え、より確実な周辺確認をサポートする。

We developed a function for real-time image recognition using three monocular cameras equipped on a hydraulic excavator. This function creates a rectangular bounding box around any recognized human-like shape, and gives a warning sound. The current FIELD VIEW MONITOR (FVM) system, which is offered as part of the standard equipment, is able to display real-time stitched 270-degree video taken by the three monocular cameras at the back of hydraulic excavator on the monitor. This system earns a good reputation among customers for providing operators with an easy and intuitive safety confirmation method, and for registering in NETIS VE. We believe that adding our new image recognition function to the FVM system will offer more reliable safety confirmation, by further providing operators with the timing of checking the monitor.

1 まえがき

油圧ショベルは、人と比べて大型で重量が大きく動きも速い。周辺に作業や障害物が混在する現場では、安全を確保すべく確実な周辺確認が求められる。しかしながら、車体の左前方にある運転室からは、エンジンフードやカウンタウエイトが視界を遮り、特に車体後方と右側方にオペレータから直接目視できない死角が多くなることから、ミラーやカメラで周辺確認を可能にする必要がある。

従来機能であるFVM¹⁾は、油圧ショベルの後方、右側方、左側方に広角・高感度でダイナミックレンジが広い単眼カメラを3台搭載している。それらの画像をリアルタイムで合成し、運転室内のモニタに表示することにより油圧ショベルの後方270°をひと目で確認できる。図1に、カメラ配置と合成画像の事例を示す。

FPGAによるパイプライン処理で、フレームレートが低下することなく画像を合成表示する。車体のごく近傍から地平線の上空までカバーし大型の物体でも全体を映し出せること

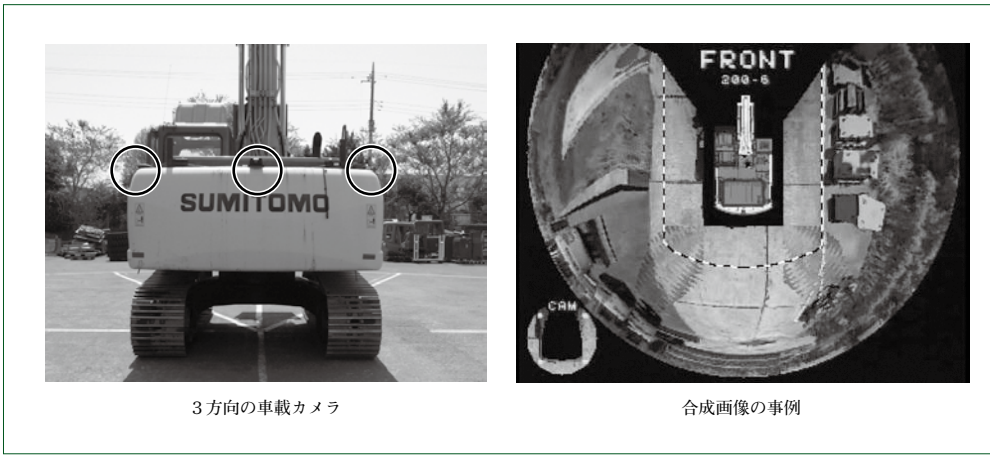


図1 従来機能であるFVM
Current FVM



図2 画像上の人の見かけ変化
Changes in human appearance in camera images

と、旋回動作を伴う油圧ショベルに好適な円形画像が特長としてあげられる。2011年に油圧ショベルのオプションとして販売を開始し、後に標準装備とした。直感的な分かりやすさと、NETIS VE登録(登録No. KT-110057-VE)により好評を得ている⁽²⁾。

しかしながら、オペレータによってミラーやモニタ確認のタイミングや頻度が異なることから、たとえば作業に集中してモニタから目を離している間に、周辺の作業者が油圧ショベルに接近してしまうという状況が想定される。そこで、カメラ画像から人らしい像を認識してモニタ表示と音で知らせることでオペレータに周辺確認のきっかけを与える機能を開発した。

2 開発における目標および技術課題

2.1 目標

開発に当たっては、次の3項目を目標とした。

目標1：画像認識のみによる人らしき評価

目標2：3方向のカメラ画像を每秒10回以上認識

目標3：小型で安価な車載装置

高価な3Dセンサなどを用いず、単眼カメラのみによりローコストで簡便なシステム構成としながら、FVMの合成画像がカバーする範囲全体を画像認識することを目的としている。

本報では、設定した目標を実現するに当たっての技術課題と解決方策および実際の動作事例を紹介する。

2.2 技術課題

(1) 画像認識による人らしき評価

・課題1：画像上での人見かけ変化

背景と服装の色のコントラスト、上半身と下半身で色が異なる服装、携行品、カメラに対する位置や向き、ポーズなど、画像上の人見かけは多様に变化する。また、人の身長よりも高い油圧ショベルの車体上面にカメラを設置するので、人がカメラに接近した場合と離れた場合では、像の大きさだけでなく、頭と体の比

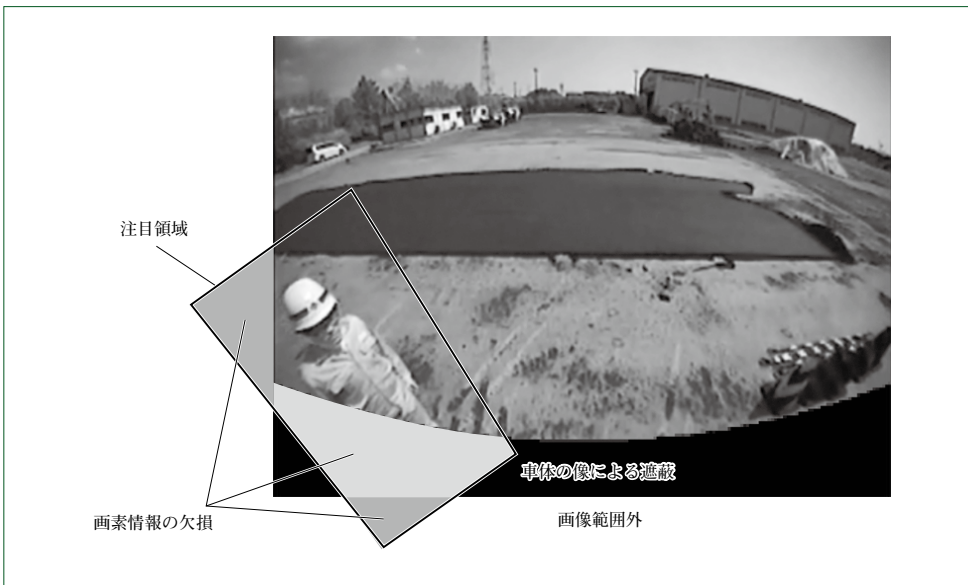


図3 視野の端での画素欠落
Example of missing pixels at corner of image

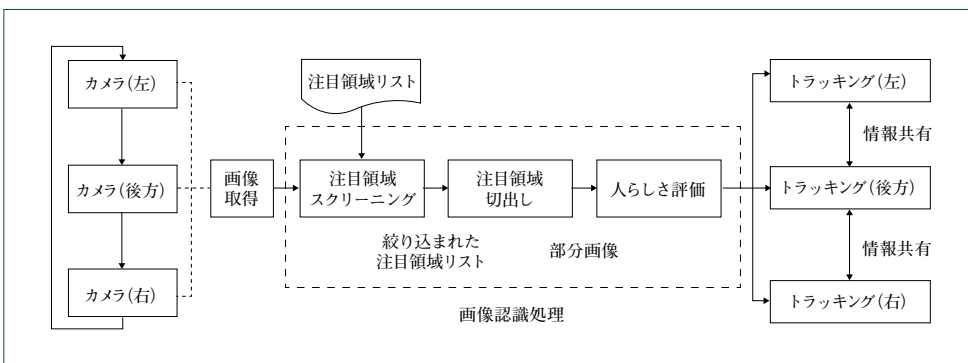


図4 画像認識処理の全体構成
Overall structure of image recognition system

率など見かけが大きく変化する。図2に、画像の例を示す。本開発では認識する人を歩行者に限定したが、それでもあらゆる見かけの変化を想定して人らしさを数値化するアルゴリズムの手動設計は困難である。

・課題2：広角カメラ画像の歪み

後方カメラと側方カメラの境界部も隙間なくカバーすべく広角カメラを採用し、車体のごく近傍から遠方までをカバーすることを目的として斜め下向きに設置する。これにより視野の左右端では物体の像が傾いて映り、視野の下端に車体の像が映りこむ場合がある。図3に、画像の例を示す。人らしさを評価すべく像を囲む注目領域を設定すると、一部が画像範囲外や車体の像に及び、画像情報が欠損する。

目標1の、「画像認識のみによる人らしさ評価」を達成するには、これらの技術課題を解決する必要がある。本開発ではその解決に向け、機械学習による評価モデルを採用した。

機械学習で人らしさの評価モデルを獲得するには、人とそれ以外の正解を付与した大量の教師画像が必要となる。そこで、油圧ショベルの使用現場を模擬した環境にレーザセンサとカメラを設置し、レーザセンサで人の位置を計測しながらカメラ画像を収集した。そして人の位置の計測結果にもとづき、カメラ画像上に注目領域を設定し、画像を切り出してデータベースに格納した。さらに、カメラに対する人の位置、撮影日時、背景や天候、注目領域が画像範囲外や車体の像に及んだ範囲、切り出し元のカメラ画像も併せてデータベースに格納した。

このデータベースから、カメラとの距離がごく近い範囲とそれ以外の範囲に分けて無作為にサンプルを抽出し、さらに画像範囲外の画素や、車体の像にかかった画素の割合が大きいサンプルを除外して人の教師画像とした。これは画像範囲外の画素や車体の像を、人らしさの特徴として学習させないことを目的としている。

なお人以外の教師画像は、人が映っていない画像に任意

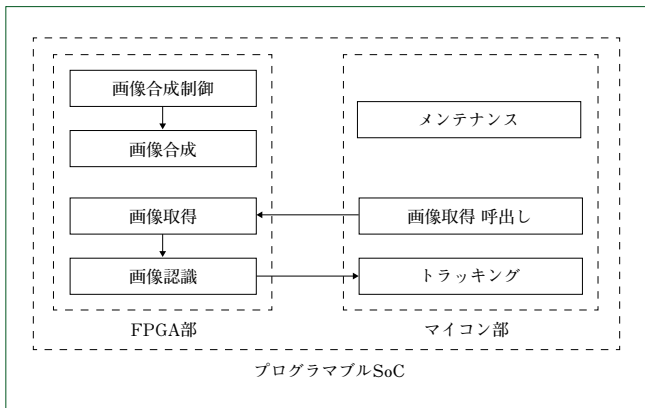


図5 プログラマブルSoCを用いたシステム化
Systematization using programmable SoC

の注目領域を設定し、無作為に抽出したものである。

人の教師画像の収録に当たっては、服装や背景の組み合わせを増やすよう心がけたが限度がある。そこで、機械学習の前処理として輝度勾配方向の分布にもとづく特徴ベクトル変換を行い、それを84分割した部分特徴ベクトルごとに正規化することで、背景と服装のコントラスト、上半身と下半身で色が異なる服装などの影響を受けにくくした。機械学習は、正規化した部分特徴ベクトルを選択して最大99回のロジスティック回帰を行うアンサンブル学習である。

(2) 画像認識処理と全体構成

・課題3：画像認識処理サイクルの高速化と安定化

計算回数が多い画像認識処理を安定した時間サイクルで実行し続ける必要がある。FPGAでハード化して処理時間のばらつきを低減するが、ローコストなFPGAでは乗算器や内部メモリなどのリソース制限が厳しい。

・課題4：注目領域の高密度な配置

人らしさを評価する注目領域は、検出範囲を限定してもカメラ1台当たり数千箇所が必要である。だが、これらのすべてについて人らしさを評価すると、計算量が多すぎて目標処理周期を達成できない。

目標2の「3方向のカメラ画像を每秒10回以上認識」を達成するには、これらの技術課題を解決しなければならない。本開発では、図4に示す構成を採用した。

注目領域は、カメラに対する人の位置ごとに、画像上で人を囲む矩形をあらかじめ計算したものである。

画像認識処理は、カメラ画像から抽出したグレースケール画像を入力し、人らしいと判断した注目領域の情報を出力するFPGAモジュールである。3台のカメラからの画像を時分割で入力してFPGAモジュールを共有することで、FPGAリソースの消費を削減した。注目領域スクリーニング処理、注目領域切出し処理、人らしき評価処理を備えている。

注目領域スクリーニング処理は、視野内の注目領域をすべて入力し、注目領域を切り出すことなく、簡易な画像認識で候補を絞り込む。ここでの画像認識は、注目領域に人らしい像があると仮定して、その一部分を輝度分

表1 システムの概略仕様
System outline specifications

カメラ画像入力	信号形式	NTSC
画像合成出力	信号形式	NTSC
トラッキング出力	通信方式	CAN
プログラマブル SoC	CPU	デュアルコア 800MHz
	RAM	2048MB DDR 3 L SDRAM
	画像合成処理メモリ	64Mbit SDR-SDRAM
車載ユニット	外形寸法(mm)	215×128×36

布にもとづいて特徴ベクトル変換し、機械学習モデルで評価する。機械学習モデルは、軽量のランダムフォレストである。

注目領域切出し処理は、注目領域スクリーニング処理が絞り込んだ注目領域内の画素を抽出し、大きさを統一した部分画像に正規化する。

人らしき評価処理は、注目領域切出し処理が生成した部分画像に対し、課題1、2で説明した人らしき評価モデルを適用し、閾値と比較して人らしいかどうかを判定する。

トラッキング処理は、画像認識処理が人らしいと判定した注目領域の位置、時刻およびカメラIDを入力し、人の移動とカメラの移動の想定範囲内で人らしき判定の継続性を評価し、人らしき判定継続中の対象の位置情報を出力するソフトウェアである。出力する位置情報は対象を囲む矩形であるが、前述の注目領域とは異なるようにあらかじめ計算したものであり、視野の端や移動中の人もうまく囲むことができる。また、対象が複数のカメラの視野をまたいで移動する場合を想定し、隣接するカメラ間で対象の情報を共有する機能を備え、さらには対象が複数ある場合に各カメラからの距離に近い順に選択する機能も備えている。ヒストグラムフィルタ³⁾を応用した軽量のアルゴリズムで、ソフトウェア処理でも全体の画像認識サイクルに影響を与えない。

(3) システム構成とハードウェア

・課題5：基板面積の縮小

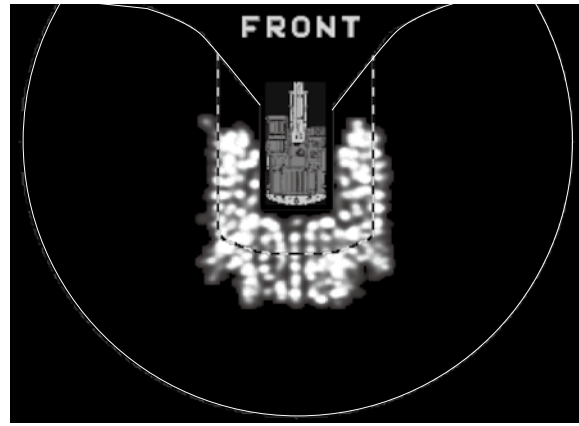
従来機能の画像合成モジュール、前述の画像認識処理モジュールを実行するFPGAと、前述のトラッキングソフトウェアを実行するCPUを、それぞれ個別に搭載すると基板面積が拡大して高価になり、装置外形も大きくなり車載しづらくなる。

目標3の「小型で安価な車載装置」を達成するには、この課題を解決しなければならない。本開発では、図5に示す構成を採用した。表1に、構成の概略仕様を示す。

プログラマブルSoCは、FPGA部とCPUおよび各種ペリフェラルインターフェースを有するマイコン部を同一



図6 多様な見かけ変化への対応
Example of dealing with various appearance changes



車体から0.5~2.0mの範囲内(後方は4.0mまで)

図7 認識範囲に隙間がないことの検査
Recognition range (shown in light points) with no gaps within 2-meter line

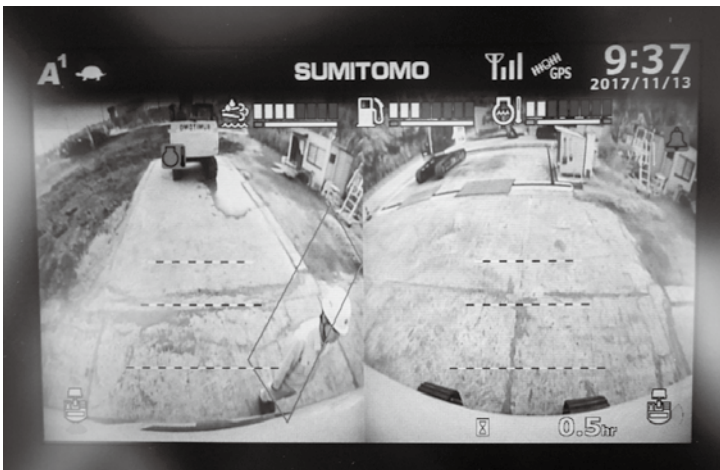


図8 視野の端での認識結果
Example of recognition results at boundary of 2 cameras

チップ内に納めたものである。

FPGA部には、画像合成モジュールおよびそれを制御するモジュールと、画像認識モジュールおよびそこにグレースケール画像を供給する画像取得モジュールを一体化した。マイコン部には、画像取得モジュールを呼び出すソフトウェア、トラッキングソフトウェアおよび各FPGAモジュールやソフトウェアを設定し、調整するメンテナンスソフトウェアをインストールした。

3 動作の事例

図6に、カメラに対する人の向きや距離、服装や背景の種類がさまざまである場合のトラッキング出力をモニタ表示した事例を示す。画像上での見かけの変化によらず、人らしい像があればモニタ表示できていることが分かる。

図7は、油圧ショベルの周辺におおむね格子状の検査位置を設定し、各検査位置に一定の滞留時間で人を立たせ、そのときのトラッキング出力の頻度を濃淡画像にしたものである。色が明るい点ほど、連続して人らしいと判定し続けたことを意味する。隣接カメラ間の境界部、油圧ショベルのごく近傍

を含め、隙間なく人らしい像をトラッキングできることが分かる。

図8に、隣接カメラ間の境界部に沿って人を歩行接近させたときのトラッキング出力をモニタ表示した事例を示す。広角カメラの画像歪みに対応し、視野の端付近で像が倒れて見える場合でも、人らしい像があればモニタ表示できることが分かる。

従来機能であるFVMの合成画像上にトラッキング出力を表示した事例を図9に示す。油圧ショベルの後方270°をひと目で周辺確認できるだけでなく、人らしい像があればモニタ表示と同時に音でも知らせ、周辺確認のきっかけとすることができる。

図10は、人ではないものを人らしいと判定した時のトラッキング出力をモニタ表示したものである。この誤認は、単眼カメラ画像のみで奥行き情報を利用できないことと、機械学習モデルによる人らしさ評価のみで、人体を構成する腕、脚、体および頭などの有無や、形状までは評価していないことによる。

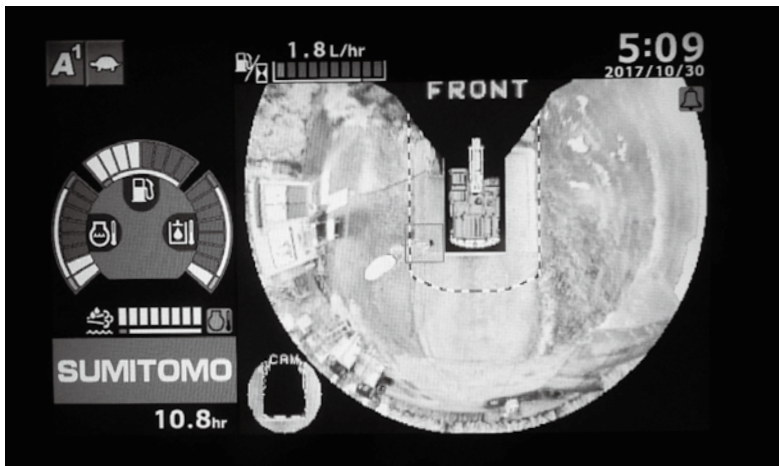


図9 画像認識結果を合成画像上へ表示した例
Example of displaying recognition results on top of stitched image



図10 人ではないが人らしいと判定した例
Example of recognizing background as human by mistake

4 むすび

- (1) 油圧ショベルに搭載した単眼カメラの画像を認識し、人らしい像があればモニタ表示と音で知らせることで、オペレータに周辺確認のきっかけを与えるFVM2を開発し実用化した。
- (2) FVM2は、住友建機株式会社が油圧ショベルの一部機種の標準装備として販売を開始した。
- (3) 実際にFVM2を実現場で使用している顧客からは、「音で気付き、表示で確認できるのは、注意喚起となり非常に良い」、「人を囲う枠の表示は分かりやすくて良い」などの好評を得ている。

(参考文献)

- (1) 清田芳永, 因藤雅人, 加藤英彦, フィールドビューモニターシステムの開発－映像合成による油圧ショベルの周囲確認支援システム－, 住友重機械技報, No.179, 2012, p.5.
- (2) 新技術情報提供システム(New Technology Information System: NETIS), <http://www.netis.mlit.go.jp/NetisRev/NewIndex.asp>, 2018年8月現在.

- (3) Sebastian Thrun, Wolfram Burgard, Dieter Fox, Probabilistic Robotics, The MIT Press.

※「FVM」は、住友重機械工業株式会社の登録商標です。

ICT施工対応油圧ショベル SH200-7 MG・MC仕様

Hydraulic Excavator for ICT Construction SH200-7 MG/MC

● 泉川 岳哉*
Takeya IZUMIKAWA



SH200-7 3DMC仕様
SH200-7 3DMC overview



1 はじめに

住友建機株式会社では、特定特殊自動車排出ガスの規制等に関する法律(オフロード法)2014年基準に適合し、また国土交通省が推進するi-ConstructionをはじめとするICT施工に対応可能なICT油圧ショベルSH200-7のMG(マシンガイダンス)・MC(マシンコントロール)仕様を開発した。本報ではその概要について紹介する。

国土交通省では、土工における調査・測量、設計、施工および検査のプロセスにおいてICTや3次元データを活用し、生産性の向上や魅力ある建設現場の実現を目指すi-Constructionを進めており、ICT土工の施工件数は着実に増加している。ただ、施工現場の規模や作業内容によっては、2次元のシステムでも安全性と生産性の向上は可能であり、必ずしも3次元データの活用が必要なわけではない。

住友建機では、さまざまな現場や顧客のニーズに応えるべく、小規模な現場でも導入が容易な2DMG仕様、作業機を半自動制御することによりオペレータの負担を軽減し、効率的に作業ができる2DMC仕様、さらにi-Constructionに対応可能な3DMG、3DMC仕様と、4種類のICT油圧ショベルを開発した。各仕様はMGからMCへ、2Dから3Dへそれぞれアップグレードすることも可能であり、さらにSH200-7標準仕様からのアップグレードも可能である。

2 システムの概要

図1に、ICT油圧ショベルSH200-7 MG・MC仕様の機器構成を示す。Trimble社製Earthworksシステムを搭載し、住友建機のシステムと融合することでMG・MCの機能を実現している。

ショベルの本体とブーム、アームおよびバケットリンクに設置されたIMU(Inertial Measurement Unit:慣性計測装置)によりショベルの姿勢を高精度に検知する。3D仕様では、GNSS(Global Navigation Satellite System)アンテナと通信機器が搭載され、衛星測位情報と補正情報によりショベル本体の絶対的な位置を検知する。ICTコントローラは各IMUと3D機器からの情報により作業機の位置を算出し、さらに設定されている施工目標面とバケット爪先との距離情報を算出する。その結果はショベルコントローラに入力され、モニタディスプレイにガイダンス情報として表示される。オペレータはこのガイダンス情報を確認しながらショベルを操作することで、設定されている施工目標面どおりに施工することが可能となる。

施工目標面の情報はモニタディスプレイにより設定することが可能で、2D仕様であれば、深さと勾配、3D仕様では設計データにもとづいて設定することが可能である。施工目標面は操作レバーに設置されている専用スイッチでも設定できる。

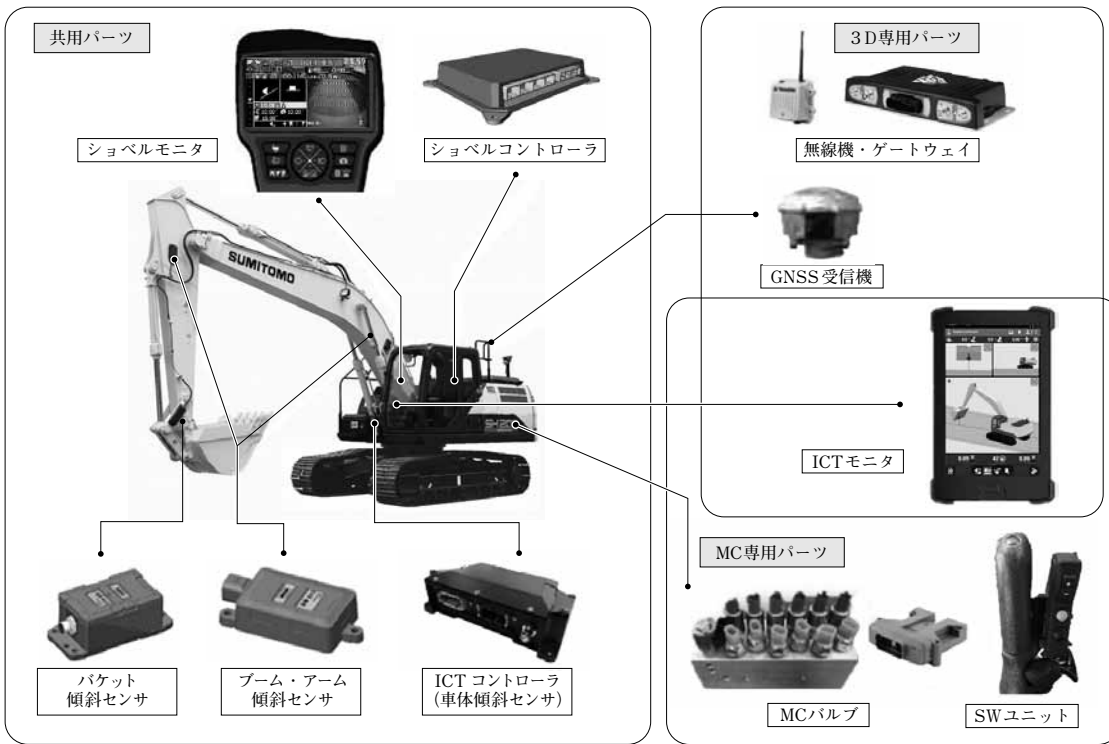


図1 MG・MC仕様の機器構成図
MG・MC configuration diagram

MC仕様では、ICTコントローラはバケット爪先距離情報から作業機を半自動制御する指令値を算出し、MCバルブを制御することでMC機能を実現する。MC半自動制御により、オペレータはアームを操作するだけで施工目標面どおりに施工することが可能となる。

2.1 モニタディスプレイ(図2, 図3)

2DMG仕様では、ショベルの標準モニタでガイダンス情報の確認や設定を行うことができる。ライトバーやバケット爪先距離などのガイダンス情報は色分けされ、大きく表示することで視認性を向上させている。また、バケット爪先で指定した任意の2点間の距離を測定できる測量モードも搭載されており、掘削作業以外でも出来形や構造物のおおよその高さや角度のチェックなどをショベルから降りずに行うことができる。

ガイダンス情報と併せてカメラ画像も同時表示可能であり、リヤカメラ画像やショベルの周囲270°を映し出すFVM(フィールドビューモニター)画像だけでなくショベル周辺の人に対するお知らせ機能付き周囲監視装置FVM2画像も同時に確認でき、ガイダンス使用中も安全に作業を行うことができる。

MC仕様や3D仕様ではICT専用の10インチタッチパネルモニタが追加され、設計データを含むより多くの情報を確認・設定することができる。設計データ上に平面図の画像を重ねて表示することが可能となっており、施工の状況をより把握しやすくなっている。この場合もショベルの標準モニタではカメラ画像、FVMおよびFVM2の画像が確認可能である。

2.2 レバースイッチ

使用頻度の高いMG・MC機能は、操作レバーに取り付けら

れたレバースイッチ(図4, 図5)で操作することができる。操作レバーは、通常のショベルと操作感が変わらないように標準仕様の油圧ショベルと同一のものを使用している。レバースイッチは、ショベルの操作を妨げず、かつスイッチ操作がしやすい位置に取り付けられている。2DMG仕様の操作レバーには、基準点の設定やガイダンスモードと測量モードの切替えなどのスイッチが、2DMC仕様には半自動制御のON/OFFスイッチが取り付けられている。

半自動制御については、安全性を考慮して半自動制御スイッチをON操作している時のみ作動し、オペレータが危険回避操作などの通常操作を行うときにはスイッチを放すだけで直ちにOFFになるよう設定されている。半自動制御スイッチは、レバーの握り方が異なるさまざまなオペレータが容易に操作できるように位置調整が可能なトリガタイプとなっている。

2.3 3D機器

3D仕様で使用するGNSSアンテナはカウンタウエイト上に、無線機はキャブ後方に設置されている。これらの機器は、作業機の位置算出精度や、低緯度衛星からの受信性能およびブーム姿勢による衛星測位や無線通信への影響を考慮し設置されている。

2D仕様機には3D機器の後付けを容易に可能にすべく、各機器の近傍に接続用のコネクタが準備されている。

3 MC仕様の半自動制御

MC仕様機では、施工目標面にバケットの爪先が沿うように半自動制御を行うことでオペレータの負担を軽減し、効率良く操作ができるようになる。

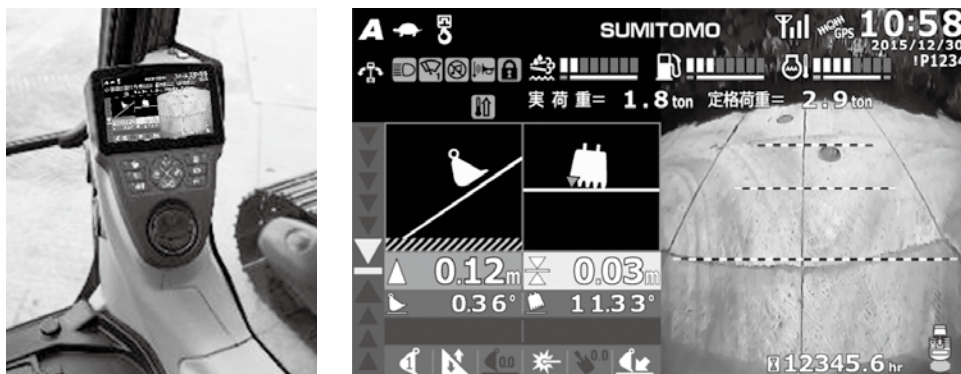


図2 2DMGモニタ表示例
2DMG monitor display example

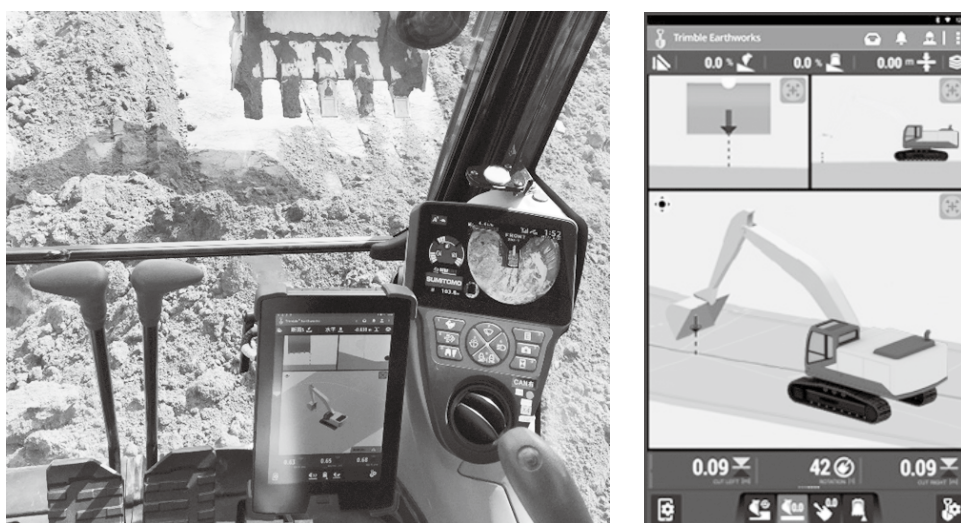


図3 2DMC・3DMCモニタ表示例
2DMC・3DMC monitor display example

MC仕様機に搭載された半自動制御について次に示す。

3.1 油圧システム概要

SH200-7では低燃費と高作業量を両立した新油圧システム「SIH：S α 」を搭載しており、フル電子制御化された油圧ポンプによる緻密な流量コントロールを可能にするとともに、電子制御を組み合わせた大容量コントロールバルブにより、作業に応じた最適油圧制御を実現している。

SIH：S α では、オペレータのレバー操作によるパイロット圧力や、シリンダ圧力情報を圧力センサより検出し、現在油圧ショベルが行っている作業内容を、ショベルコントローラにて把握することが可能である。動作に合わせて油圧ポンプ馬力設定および流量制御の最適化を図り、重負荷作業時の力強さ、整地作業時のスムーズな作業性および燃料消費の改善を実現している。

MC仕様機では、新油圧システムのSIH：S α とTrimble社製のEarthworksシステムを融合させることで、標準機と変わらないスムーズな作業性と低燃費性能を両立した半自動制御を実現している。MCの半自動制御状態においてもオペレータはレバー操作量に応じた速度で作業機を操作でき、精度よ

り作業量を優先する場合は速く、精度を優先する場合はゆっくりとレバーを操作することで、荒掘削から整地作業まで直感的な操作で効率良く作業を行うことができる。また、オペレータが危険回避操作などのレバー操作を行った場合は、半自動制御よりオペレータの操作が優先されるように制御される。

3.2 ブーム半自動制御

ICTコントローラは、ショベルの姿勢とオペレータの操作状況からバケットの爪先が施工目標面に沿うようにブームの半自動制御を行う。半自動制御はブームの上げ下げの両方に対して行われ、作業機の遠方から手前側まで幅広い範囲の整地作業をアームレバー操作のみで行うことができる。ブーム半自動制御は、アーム操作だけでなくバケット操作に対しても行われる。バケット単独掘削時でもバケット操作が止まることなく施工目標面に沿うようブームが半自動制御される。半自動制御は、レバーに装着されている半自動スイッチがONの状態では、施工目標面とバケットの爪先の距離が所定の範囲にあるときのみ作動し、オペレータが意図せずに半自動制御が作動することを防止している。



図4 2 DMGレバースイッチ
2 DMG lever switch



図5 2 DMC・3 DMCレバースイッチ
2 DMC・3 DMC lever switch



図6 MC仕様の半自動制御
SH200-7 MC semi-automatic control

3.3 バケット半自動制御

ブームの半自動制御時にバケットの底面角度が施工目標面に対し平行状態を保持するよう、バケット角度の半自動制御が行われる(図6)。これにより、オペレータはアームレバーの操作のみで法面成形作業を行うことができる。

バケット角度の半自動制御は、バケット底面角度と施工目標面とがほぼ平行状態となる所定の条件を満たした場合に作動し、掘削作業中などのバケット角度が施工目標面と平行でない場合には作動しないので、通常のショベルと同様に掘削作業を行うことができる。法面から小段を連続的に成形するような場合でも、施工目標面の変化点でオペレータがバケット底面角度をほぼ平行に合わせることで、連続的なバケット角度の半自動制御を行うことができる。

また、半自動制御されるバケット底面角度は施工目標面に対して上下調整することが可能となっている。硬い土質での爪先を立てた掘削や、柔らかい土質でのバケット底面を押し付けながらの成形など、作業に合わせて調整を行うことができる。

4 おわりに

i-Constructionが目指している生産性と安全性の向上に着目して開発したSH200-7 MG・MC仕様について紹介してきた。分かりやすいガイダンス表示、測量モードやお知らせ機能付き周囲監視装置FVM2が表示可能なモニタ、作業性を損なわず効率良く操作することが可能なレバースイッチ、スムーズな操作性と低燃費性能を両立させた半自動制御により、生産性や安全性が向上し、さらにはオペレータの疲労軽減が期待できる。今後もさらなる生産性と安全性の向上をめざして新しい技術開発を進めていきたい。

※「FVM」は、住友重機械工業株式会社の登録商標です。

ホイール式アスファルトフィニッシャー HA60W-10

Wheeled Paver HA60W-10

●馬場 信行*
Nobuyuki BABA



図1 ホイール式アスファルトフィニッシャー HA60W-10
Wheeled paver HA60W-10

表1 主要仕様
Main specifications

全長	mm	6955
全幅	mm	2490
寸法 全高	mm	2575(キャノピなし)/ 3640(キャノピ付き)
質量(標準仕様)	kg	ガス加熱 13860(TV*仕様)/13490(V**仕様)
		電気加熱 14130(TV仕様)/13780(V仕様)
舗装幅	m	2.3~6.0(無段階)
舗装能力	舗装厚	mm 10~300
	舗装速度	m/min 1~20
	締固方式	— TV仕様/V仕様
ホッパ容量	t	11
エンジン	メーカー 型式	— いすゞ 4JJ1X
	総排気量	L 2.999
	定格出力(ネット)	kW 86/2200(r/min)
	最大トルク(ネット)	N·m 375/1800(r/min)

* TV: タンバ&バイブレータ ** V: バイブレータ

1 はじめに

アスファルトフィニッシャーは道路舗装工事に使用される建設機械で、アスファルト混合物を規定の幅・厚さで敷きならし、締め固め、道路の舗装を連続的に行う機械である。その機種構成は、最大施工幅が4.5m未満のミニ、4.5~6.0mの中型およびそれ以上の大型に分類される。また、走行方式でホイール式とクローラ式に分類される。

本報では、中型に分類される最大施工幅6.0mのホイール式アスファルトフィニッシャーを特定特殊自動車排出ガスの規制等に関する法律(オフロード法)2014年基準に対応させるべくモデルチェンジしたHA60W-10について述べる。

2 製品の特長

図1にHA60W-10の外観を、表1に主要仕様を示す。

現在、国内で高い評価を得ているHA60W-10型は、旧型に比べ環境性能、利便性および安全性を進化させ市場投入した。特長を次に示す。

- (1) コモンレールによる高圧多段噴射、EGR(排気ガス再循環システム)、可変容量ターボ、尿素SCRシステム(後処理装置)を採用した最新型のエンジンを搭載することで、厳しいオフロード法2014年基準に対応している。
- (2) 本体仕様は、従来機から採用されている7型ワイドカラー液晶モニター、GPSと携帯通信網を利用した稼働管理システム(G@Nav)、モニターでの緊急操作に加え、運転席周りの視認性向上、付属装備品の準備・収納の容易化、施工速度に連動するタンバ回転数自動設定モードを新規

搭載するなど、利便性・安全性をより改善した。また、オプション装置についても、3つのカメラ映像を合成して周囲270°が監視できるFVM(フィールドビューモニター)のほか、FRPキャノピの準備・収納操作をハンドポンプによるポンピングから油圧シリンダによる昇降にすることで省力化を図った。

- (3) クリードには、2.3~6.0mまで無段階で伸縮できる利便性により高い評価を得ているJ・Paver方式を採用した。加熱方式は、ガス加熱仕様と電気加熱仕様をラインナップしており、ガス加熱仕様ではサイドプレートに熱風が通過するダクトを設け、電気加熱仕様ではオプションでヒータ付きサイドプレートが選択できることにより、端部までの仕上がり性向上を図った。

3 環境性能を向上させる技術(排ガス規制対応)

- (1) 尿素SCR(Selective Catalytic Reduction)システム(後処理装置)

近年、環境性能への要求は高まる一方であり、建設機械に多く採用されているディーゼルエンジンでは、互いにトレードオフの関係にあるPM(粒子状物質)と、NO_x(窒素酸化物)の両方を低減することが課題となっている。コモンレールによる高圧多段噴射などによりPMの低減が進んだが、オフロード法2014年基準ではNO_xの規制値が厳しくなった。これに対応すべく採用されたのが尿素SCRシステム(図2)である。酸化触媒によるHC(炭化水素)、CO(一酸化炭素)、PMの浄化に加え、排気ガス中へ尿素水を噴射し生成されたアンモ

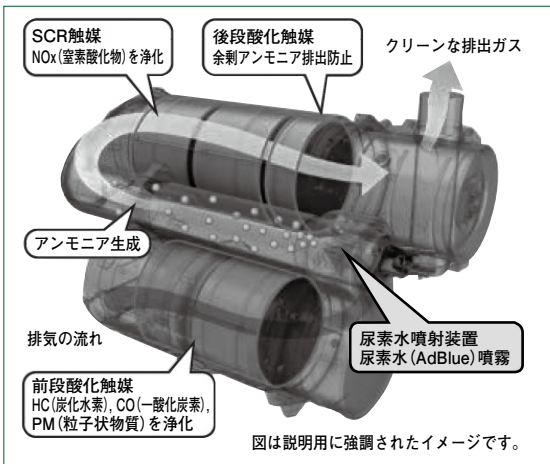


図2 尿素SCRシステム
Selective catalytic reduction system

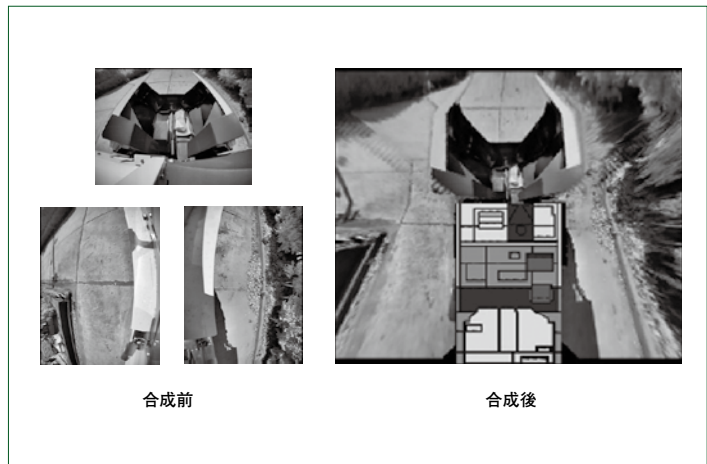


図3 FVMの表示例
FVM example

ニアとNOxを反応させて無害な窒素と水に還元している。

(2) 尿素水の保管

上記の尿素SCRシステムにおいて、尿素水は燃料の軽油と同様に消費されることから、アスファルトフィニッシャーには尿素水を保管するタンクが設置されている。しかしながら、尿素水は寒冷時に凍結してしまうのでホース内で凍結しないようエンジン停止時にタンクへ吸い戻したり、樹脂製のタンクを使用して体積の膨張にも対応することができる構造としている。また、エンジン冷却水を通す際、尿素水ホース近傍やタンク内を経路とすることで、尿素水の解凍や再凍結の防止も行っている。

4 利便性を向上させる機能および技術

(1) IoT, ICT技術

アスファルトフィニッシャーにおいても、従来機よりGPSと携帯通信網を利用した稼働管理システム(G@Nav)を採用するなど情報技術を活用しているが、今後労働力の確保が課題となる建設現場では、ICTの活用により生産性向上を目指す取り組み(i-Construction)が進められている。これに対応して建設機械メーカーは、センサメーカーなどと共同開発を行っており、当社においても順次対応を拡大中である。

(2) 速度に連動するタンパ回転数自動設定モード

従来は熟練した作業者が手動により設定していたタンパ回転数を、施工速度に連動させて自動的に設定する新機能を採用し利便性を向上させた。

5 安全性を向上させる機能・技術

(1) FVM

FVMは、油圧ショベルの後方および周辺監視用に開発した画像合成技術で、アスファルトフィニッシャー用に搭載できるよう開発されたものである。機械の前方および左右の3つのカメラ映像を、1つの映像に合成して表示することで、ホッパ内の合材量や周辺の安全を同時に

確認することを可能とした(図3)。これにより、機械周辺の死角を大幅に削減し安全性を向上させた。

FVMは、従来機において世界で初めてアスファルトフィニッシャーに採用した機能であるが、海外メーカーでも同様のシステムが採用され始めている。今回は合成処理の見直しやカメラ画像の鮮明化を行い、さらなる安全性の向上を狙った。

(2) 視認性の向上

運転席の前にエンジンを搭載し、さらにその前にホッパが設置されている構造のアスファルトフィニッシャーでは、排ガス後処理装置などによりエンジン部分に障害物が増えると、前方視界の妨げとなってしまう。この課題に対し、内部の機器配置を見直すなどして、作業装置や前面の状況の視認性を確保した。

6 おわりに

今回、特定特殊自動車排出ガスの規制等に関する法律(オフロード法)2014年基準に対応すべくモデルチェンジした最大施工幅6.0mのアスファルトフィニッシャーについて、

- (1) 製品の特長
- (2) 環境性能を向上させる技術(排ガス規制対応)
- (3) 利便性を向上させる機能・技術
- (4) 安全性を向上させる機能・技術

を紹介した。

※「FVM」は、住友重機械工業株式会社の登録商標です。
「G@Nav」および「J-Paver」は、住友建機株式会社の登録商標です。

350tつりクローラークレーン SCX3500-3

Crawler Crane SCX3500-3

●星野 浩之*
Hiroyuki HOSHINO



図1 SCX3500-3(CR36m)

表1 主要緒元
Main specifications

		クレーン仕様	タワー仕様
最大つり上げ荷重 × 半径	t×m	180×10.0	100×12.4
基本ブーム長さ(上部ブーム付き)	m	24	—
最長ブーム長さ	m	72	—
タワー長さ	m	—	24~60
タワージブ長さ	m	—	24~60
タワー+タワージブ最長	m	—	60+60
フロント/リヤ	m/min	110	110
ブーム起伏	m/min	34×2本	34×2本
タワージブ起伏	m/min	—	55
旋回速度	min ⁻¹	0.86	0.86
走行速度 高/低*	km/h	0.9/0.45	0.9/0.45
登坂能力	% (度)	30 (17)	30 (17)
エンジン名称		カミンズ QSL9 (オフロード法2014年基準適合)	
定格出力	kW/min ⁻¹ (PS/min ⁻¹)	272/2000 (370/2000)	
接地圧	kPa(kgf/cm ²)	135 (1.38) (24mブーム 180tフック付き)	152 (1.55) (タワー+タワージブ最長 100t&15tフック付き)
全装備質量	t	320 (24mブーム 180tフック付き)	360 (タワー+タワージブ最長 100t&15tフック付き)

【注】*は負荷により速度変化する

1 はじめに

住友重機械建機クレーン株式会社は、企業ビジョンにある「安心」をキーワードに、環境性能の向上やライフサイクルコストのミニマム化を目指して、2012年5月に発売した最大つり上げ能力120tのクローラークレーンSCX1200-3を皮切りにシリーズ化を進めてきた。

今回紹介するのは、そのコンセプトを継承し、シリーズ最大機種として2016年2月に販売を開始した350tつりのSCX3500-3である。最大つり上げ能力350tというクラスは、クローラークレーンのなかで200tクラスの中型機と500t超の大型機の間を埋めるクラスで、大型機の性能と中型機の汎用性が同時に求められる。

2 主要緒元

図1にSCX3500-3の外観を、表1に主要緒元を示す。

3 製品の特長

3.1 コンパクトな機械

(1) 後方小旋回仕様

従来のライブマストでブームを起伏させる構成のクレーン

の場合、ブームを最上限まで起伏させるとライブマストがカウンタウエイトからはみ出してしまふ。本機は、標準仕様ではライブマストがはみ出して後端半径は8.3mとなるが、ペンダントを短くした後方小旋回仕様ではカウンタウエイトからはみ出しはなくなり、クラス最小の6.8mとすることができる(図2)。後方小旋回仕様を選択した場合、ペンダントへの作用力が大きくなることから若干の性能低下と最長タワーの引きこしが不可といった仕様上の制限が発生するが、狭隘地で稼働できだけでなく、機械後部上方での干渉を気にせず、前方のつり荷に集中して旋回操作が可能となる。

なお、ブームとライブマストに設置されている角度計で相対角を監視することで、標準仕様と後方小旋回仕様の誤設定を防止し安全性を高めている。

(2) 前後分割型メインフレーム

本機は、輸送規制に対応しつつ、分解・組立て性能を向上させるべく高張力鋼をフレーム類に採用し、メインフレームを前後に分割することが可能な構造とした。前後フレームの結合部はフック&ピンジョイント式を採用し、分解・組立て性を向上させている(図3)。

また、前後を分解することで輸送時の全長が短くなり、

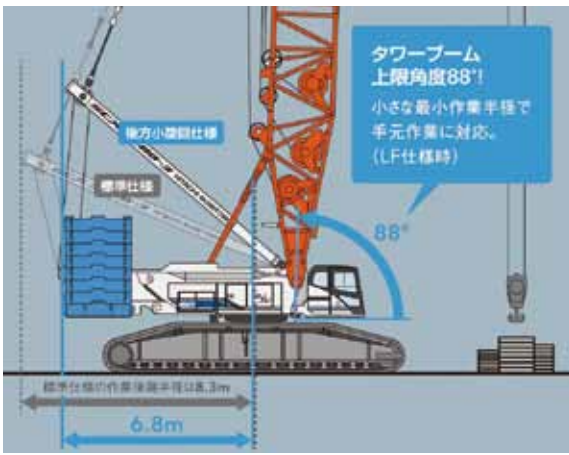


図2 標準仕様と後方小旋回仕様
Standard and short tail swing radius specifications

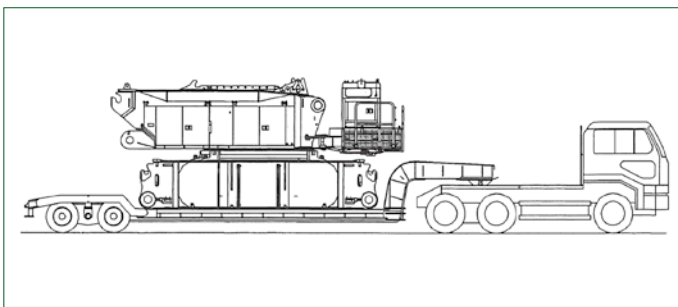


図4 本体トレーラ積載姿勢
Stowage diagram of base machine

トレーラからはみ出しがなくなることで輸送時の安全性が向上している(図4)。さらに輸送高さの制限内で各フレームの断面高さを大きくとり、軽量ながら高剛性で操作性の良いフレームを実現している。

3.2 分解・組立て性の向上

(1) クイックドロー(自力着脱装置)

オプションで設定したクイックドローは、重量がかさむクローラ、ロアウエイト、下部ブームを自力で着脱することができるので、その間、組立て用の補助クレーンは、車輛からの荷降ろしや組立てに必要なほかの作業を同時進行でき、効率的に作業が行える(図5)。

また、補助クレーンにおいてつり上げが必要となる最大重量物は、ベースカウンタウエイトの20tとなり、65tラフテレーンクレーンで分解・組立てが行えることから配車手配が容易となり、分解・組立て作業に要するコストの低減も図ることができる。さらに、各部材取付け位置での旋回角度と作業半径を記憶しておくことで、作業時間の短縮と安全性の向上が図れる。

(2) 油圧式リヤポストバックストップ

ラフィングタワークレーンの組立てにおいて、最も手間のかかる作業はフロント・リヤポストの組付けである。従来は、補助クレーンを用いてリヤポストの引きこしを行っていたが、このとき、補助クレーンの巻上げ・旋回操作と組立て機のジブ起伏ロープの巻取り・繰出し操作の同調が取れないと補助クレーンに意図しない横引き荷



図3 前後分割型メインフレーム
Front-rear split frame



図5 クイックドローによる組立て
Assembly by quick draw system

重がかかってしまうことがあった。本機では、リヤポストバックストップに長いストロークの油圧シリンダを採用し、外部油圧源を使用してリヤポストの引きこしとリヤポストペンダントの緊張を自力で行えるようにして、組立て時間の短縮と安全性の向上を図った(図6)。

3.3 安全性・操作性の向上

(1) 大型ディスプレイ

過負荷防止装置には、優れた視認性と作業視界を両立させた大型ディスプレイを新たに採用した。従来よりも大型化したディスプレイは、表示項目の多様化に対応しつつ、必要な情報をシンプルに画面表示し、確実な情報伝達を実現するとともにディスプレイの視認性と作業視界の確保を両立させた(図7)。

また、最大44通りの警報や予報をオペレータや周囲に音声で知らせ、注意を喚起して事故を低減させるボイスアラームを標準装備した。具体的な警報や予報を音声で行うことで、より分かりやすく的確に安全確保を促している。

(2) 旋回角度制限装置

狭い現場や障害物の多い現場、また、線路際での施工などでは旋回範囲が制限されることがある。このような場合に対応すべくオプションで旋回角度制限装置を準備している。

本機能を有効にすると、下部走行体と上部走行体との相対位置(角度)が検出され、上部旋回体が下部旋回に対

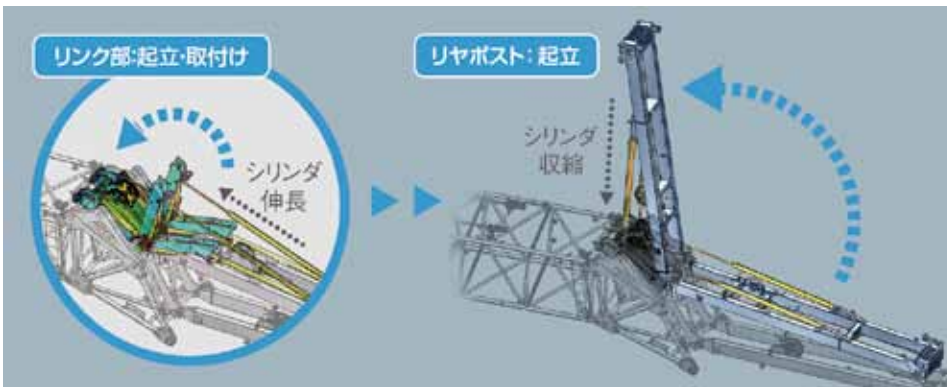


図6 リヤポストの自力引きこし
Self raise of rear post

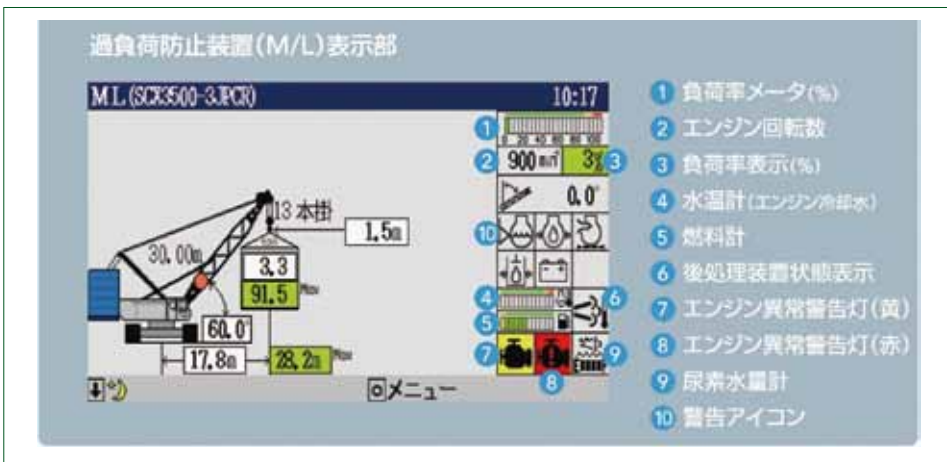


図7 ディスプレイ表示内容
Contents of moment limiter display

してどの位置にあるかがディスプレイに表示される。

旋回範囲制限機能では、「警報型」と「停止型」とを選択できる。あらかじめセットした旋回位置に近付くと、警報型では警報を発してオペレータに注意を促し、停止型では旋回速度を自動的に落としセット位置で停止する(図8)。つり荷の重さや旋回速度によって旋回慣性力が異なるが、どのような条件下でも荷ぶれの小さいスムーズな停止ができるように旋回時の圧力、旋回角度および旋回速度を検出し、それらをフィードバックさせて減速制御を行うことを可能とした。

(3) 旋回ブレーキ装置

タワーなど長尺仕様での作業時に、横風や地盤の傾斜といった現場の条件によってはブレーキ解除と同時に旋回が流されるなど、難しい操作を要求される場合がある。本機では、足踏みペダルを使って旋回の油圧リリーフ圧力を増減し、踏み加減によって旋回ブレーキ力を制御することができる旋回ブレーキ装置をオプション設定した(図9)。手で行う旋回操作を足(ペダル)によるブレーキ操作で補佐することで、旋回操作のインテグレーション性を向上させている。

またサービスブレーキ的な使い方だけでなく、決まった旋回位置での繰返し作業などにも有効である。旋回停止時の逆ノッチ操作の代替として使うことによってポンプ負荷を低減でき、作動油温上昇を抑制して省燃費にも貢献することができる。

3.4 環境への対応

(1) ECOモード

つり荷が軽負荷のときに、低いエンジン回転でも高速でフックの巻上げ・巻下げ、ブームの起伏および走行ができる機能、ECOモード(図10)を標準装備した。たとえば、タワー作業時にはつり荷がないまま高揚程操作を行うことがあるが、そのような場合でもエンジン回転を上げずに高速巻上げ・巻下げができることから作業性が向上し、騒音が抑制され、さらには燃費を低減することもできる。

また、このECOモードはウインチレバーを高速側に入れた場合のみ作動するようになっているので、インテグレーション時など微操作が必要なときには通常の感覚のまま操作できるという優れた特長がある。この特長により、ECOモードに入れておけば、エンジン回転や負荷など

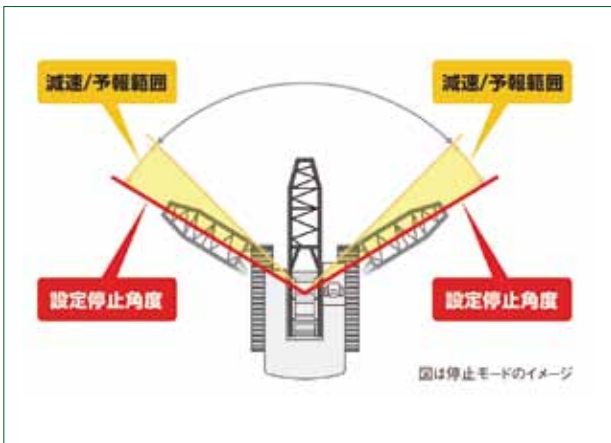


図8 旋回制限範囲のイメージ
Image of swing restriction



図9 旋回ブレーキ操作ペダル
Swing brake pedal

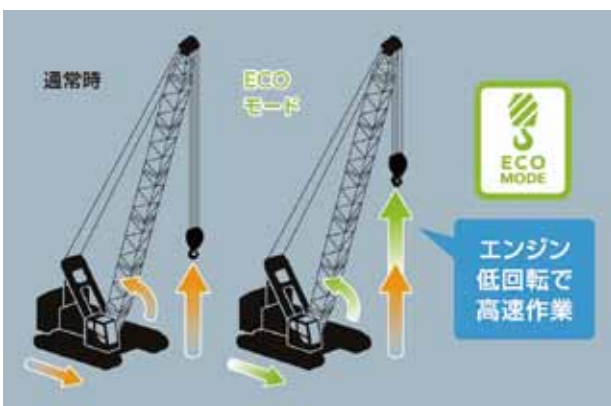


図10 ECOモード
ECO mode



図11 ECOモードスイッチ
ECO mode switch

の条件がそろったときに自動的に作動することで高速作業も微速作業も自然に行うことができ、オペレータに負担をかけない。

旋回グリップにはON/OFFスイッチ(図11)を設けることで、作動および解除をいつでも可能とした。

4 おわりに

- (1) 標準仕様に加え、後方小旋回仕様を設定することでクラス最小の後端半径6.8mを実現した。
- (2) 自力分解・組立て装置を充実させ、小型の補助クレーンでの分解・組立てを可能とした。
- (3) 大型ディスプレイの採用や旋回角度制限装置、旋回ブレーキなどを設定し、作業時の安全性を向上させた。
- (4) 負荷が小さい場合、低いエンジン回転数でも高速作業が可能なECOモードにより騒音の抑制や燃費の低減を実現した。

今後ますます強まる安全性向上への要求や、新しい工法・施工技術に対応すべく、顧客ニーズを反映したより良い製品を開発していく所存である。

バッテリー式フォークリフトの旋回速度制御

Safety Turn Control of Battery Forklift

●鈴木 雄 士*
Yushi SUZUKI



旋回速度制御
Safety turn control

1 はじめに

住友ナコフォークリフト株式会社は、長時間稼働の実現、旋回時の安定性の向上および安全装置の充実をコンセプトとした新型バッテリー式フォークリフトFB0.9～3.5tを2016年6月より販売している。

コンセプトの一つである旋回時の安定性の向上については、旋回時の荷崩れ防止を目的として、新たに旋回速度制御システムを搭載した。これにより、走行旋回時の荷物ズレ量は従来車と比べ1/4にまで抑えることが可能となった。

本報では、車両挙動を自動制御し、旋回時の荷物ズレ量の低減を実現した旋回速度制御システムを紹介する。

2 旋回速度制御システムの概要

車両旋回時の荷物ズレ量を低減させるには、荷物にかかる横加速度を一定量以下に制限する必要がある。

本システムは、車速センサ、タイヤ角センサおよび車両挙動を制御するソフトウェアから構成されており、2つの制御モードを備えている。一つは主に車両走行中の荷物ズレ量を低減させる「速度制御モード」、もう一つは主に車両発進時の荷物ズレ量を低減させる「トルク制御モード」である。それぞれのモードについて、その機能を紹介する。

2.1 速度制御モード

荷物にかかる横加速度は、車速が一定の時にはタイヤの舵角が大きくなるほど(旋回半径が小さくなるほど)大きくなる。また、舵角(旋回半径)が一定の時は車速が早くなるほど大き

くなる。速度制御モードは、タイヤの舵角に応じて車速を制御することにより荷物にかかる横加速度を低減させるモードである。

図1に示す通り、90°旋回やUターンのように舵角が大きい領域では、角度が大きくなるにつれて最大車速が小さくなるように制限を設けた。また、現在の車速が制限値より大きい場合は、回生ブレーキを働かせることによって自動で制限値以下になるようにした。なお、舵角が比較的小さい領域では、車速の大小にかかわらず荷崩れしにくいことから、車速に制限を設けないことで作業効率の維持を図った。

2.2 トルク制御モード

トルク制御モードは、旋回中のトルクを制御することによって荷物にかかる横加速度を低減させるモードである。本システムは、速度制御モードと同様にタイヤの舵角に応じてトルクを制御し、主にハンドルを切った状態で発進したときの荷崩れを抑える働きを担う。

図2に示す通り、舵角が小さい領域ではトルクの制限を設けず、舵角が大きい領域では角度が大きくなるにつれて最大トルクが小さくなるように制限を設けた。

また、本モードは車速が極低速時には作動しないようにしている(特許出願中)。この機能は、舵角が大きい状態で発進する場合、トルクに制限がかかっているとスムーズに発進できない可能性があることから、それを防ぐことを目的としている。荷崩れの恐れがない極低速時には本モードを作動させないようにすることで、作業効率を下げずに荷崩れ抑制の効果を十分に得ることができる。

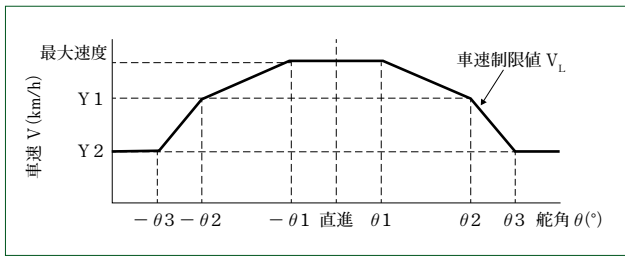


図1 速度制御モード
Speed control mode

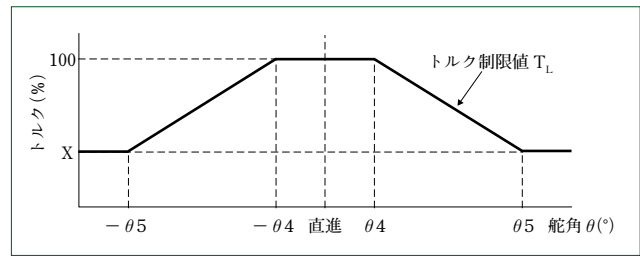


図2 トルク制御モード
Torque control mode

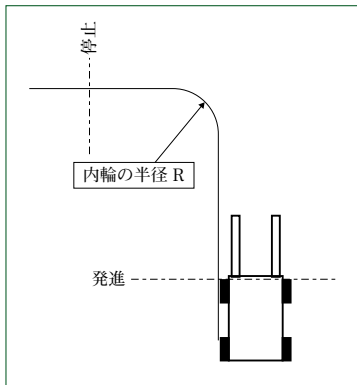


図3 試験パターン
Test pattern

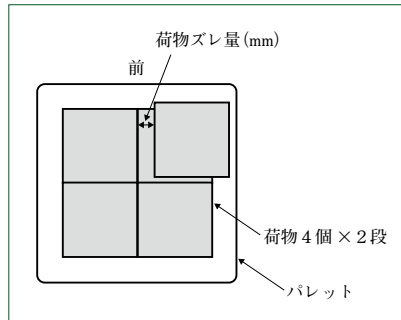


図4 荷物ズレ量の測定方法
Measuring method of load slippage

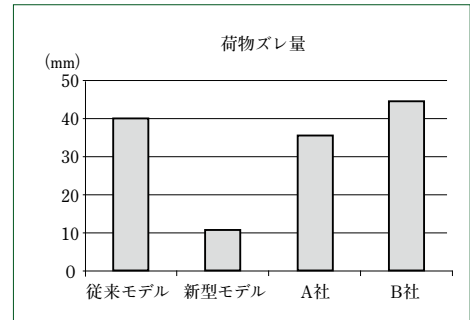


図5 荷物ズレ量の測定結果
Measurement results of load slippage

速度制御モードとトルク制御モードはそれぞれ別々に制御しているが、荷崩れ抑制と作業効率のバランスを考慮して舵角に応じた速度制限値とトルク制限値を最適値に設定してあることにより、誰が運転しても同様の効果が得られる。また、作業内容や荷物に応じて速度およびトルク制限値の設定を任意に変更することができる。

3 旋回速度制御システムの効果

本システムの荷物ズレ量の低減効果を①～④の手順で試験し、確認した。なお、本来の運搬作業では操作時にアクセルを離したり、メカニカルブレーキをかけて減速してから旋回するのが一般的だが、今回は本システムの効果を確かめたくあえて直進走行時と同じ速度で旋回することとした。

- ① フォークリフトに所定の荷物(4個×2段)を積む。
- ② 一定速で直進走行をした後、減速をせずに90°旋回(旋回半径R)する(図3)。
- ③ 再度直進走行へ戻した後、ゆっくり停止したときの荷物ズレ量を測定する(図4)。
- ④ これを従来モデルおよび他社の同格の車両でも実施し、荷物ズレ量を比較する(図5)。

荷物ズレ量は、従来モデルでは40mmであったが、本システム搭載の新型モデルでは11mmとなり、約1/4になったことが分かる。これは、旋回時に自動で回生ブレーキがかかることで車速が抑えられ、荷物にかかる横加速度が低減したことによると言える。

他社の車両の荷物ズレ量は、A社36mm、B社45mmであり、2社と比較しても約1/4程度に抑えることができ、本システムが荷物ズレ量の低減に十分な効果があることが分かった。

さらに、自動で制御されることにより、オペレータ自身に加わる横加速度や、ブレーキ操作の頻度も低減させることができ、作業時の疲労軽減にも貢献することができる。

また、本システムでは回生ブレーキを使って車速を減速させるので、旋回時にエネルギーが回収でき、省エネルギー効果も期待できる。

4 おわりに

新型バッテリー式フォークリフトの新機能として旋回速度制御システムを搭載した。

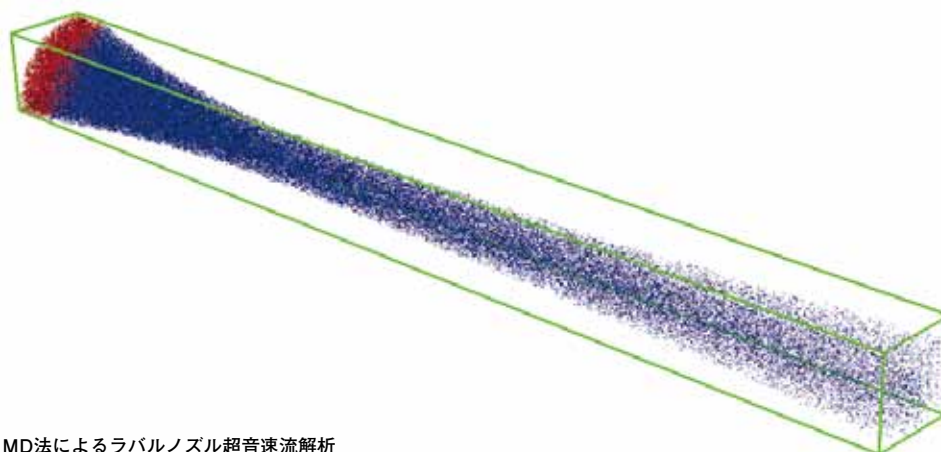
- (1) 本システムは、車両走行中の荷物ズレ量を低減させる「速度制御モード」と、車両発進時の荷物ズレ量を低減させる「トルク制御モード」から構成され、それぞれ最大車速あるいは最大トルクに制限をかける機能とした。旋回半径が小さくなるにつれてその制限を厳しくすることで、運搬中の荷物にかかる横加速度を適切に低減させ、荷物ズレ量を抑える制御を実現した。
- (2) 効果を確認する試験では、荷物ズレ量が従来モデルの車両と比較して約1/4に低減できるという結果が得られ、本システムが荷崩れの防止に大きく貢献することが分かった。また、オペレータの作業時の疲労軽減や、回生ブレーキを使うことで省エネルギーにも効果があることが分かった。

今後も、さらなる荷物ズレ量低減やオペレータの疲労軽減を実現することで、誰でも安心かつ安全に運転できるフォークリフトの開発に貢献していきたい。

非平衡分子動力学法による超音速ノズル流と凝集の解析

Supersonic Nozzle Flow and Condensation Analysis by Non-equilibrium Molecular Dynamics

●松村 裕也*
Yuya MATSUMURA



MD法によるラバルノズル超音速流解析
Analysis of supersonic flow through Laval nozzle by molecular dynamics

分子動力学(MD: Molecular Dynamics)法は、固相から気相までの物質の変化を扱うことのできる統一手法である。当社は、このMD法の計算効率を飛躍的に高めるくり込み群分子動力学(RMD: Renormalized Molecular Dynamics)法⁽¹⁾を開発した。本報では相転移を伴う流れ場のRMD解析の端緒として、非平衡MD法による凝集流れの解析を行った。圧力制御による熱浴、符号付距離関数(SDF: Signed Distance Function)による剛体壁、軸対称境界条件による計算負荷の軽減といった要素技術を開発し、ラバルノズル内のアルゴン超音速流れを解析した。得られた流れ場の分布が、連続体近似による等エントロピー膨張の理論値に沿うことを示した。また、ノズル内で流れ場が気相混合領域となる流入条件によって、ノズル下流で液滴が発生することを確認した。しかしながら、凝集に伴って放出された潜熱の流れ場への影響は見られなかった。今後はRMDを適用し、蒸気タービン低圧段の湿り蒸気などのマクロスケール解析への展開を目指す。

The molecular dynamics (MD) is a unification method that is capable of handling the phase change of a matter. We have developed the renormalized molecular dynamics (RMD)⁽¹⁾ which drastically improves the computation efficiency of the MD simulation. In this report, as a starting point of the RMD analysis of the flow with phase transitions, we analyze the condensing flow by means of the non-equilibrium molecular dynamics. A barostat heatbath, a nozzle wall with the signed distance function, and an axisymmetric boundary condition are developed to analyze the supersonic argon flow through a Laval nozzle. It is shown that the obtained flow distribution agrees with the prediction by the isentropic expansion of the continuum approximation. Also, by applying the inlet condition which yields the gas-liquid coexisting phase in the nozzle, liquid droplets are observed in the corresponding region. However, the effect of the latent heat released by the condensation on the flow field was not observed. We will apply the RMD to the current study to aim for the macroscale analysis such as wet steam of low pressure stages of a steam turbine.

1 まえがき

物体が固相から液相、気相へと変化する相転移は、工学的にも重要な現象であるが、既存の手法では解析が困難であることが知られている。特に数値流体力学(CFD: Computational Fluid Dynamics)で今日、一般的に用いられる連続体近似では、相転移を記述するには何らかのモデルを組み込む必要があり、解析の質がモデルに大きく左右される⁽²⁾。

一方、個々の原子や分子の挙動を運動方程式から求める

MD法では原理上、固相から気相まで相転移を統一的に、人為的なモデルを導入せずに扱うことが可能である。さらに、当社の独自技術であるRMD法は、MD法の特性を維持したままマクロスケール解析を可能とした。RMD法による相転移を伴う流れ場の解析技術が確立されれば、蒸気タービン低圧段の湿り蒸気解析や、冷却塔の熱交換機のパフォーマンス評価などへの適用が可能となる。本研究ではこの種のRMD解析の端緒として、まず非平衡MD法による凝集流れ解析の検証を行った。

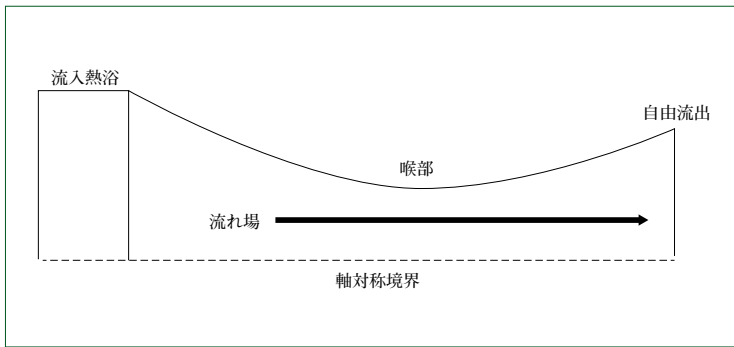


図1 ラバルノズル概略図
Schematic diagram of Laval nozzle

表1 超音速流解析条件
Supersonic flow conditions

		条件1	条件2
流入条件	温度 (K)	360.0	220.0
	圧力 (Pa)	8.34×10^6	1.56×10^7
流出条件		自由流出	
ノズル長さ (m)		4.4×10^{-7}	
喉部直径 (m)		1.52×10^{-8}	
流入口/喉部面積比		5.0	
流出口/喉部面積比		3.0	
総粒子数		約 125 000	約 250 000

2 解析手法

2.1 粒子間ポテンシャル

作動流体はアルゴンとした。MD法において不活性ガスは、粒子間相互作用にLennard-Jonesポテンシャルを用いることでその振る舞いをよく再現できることが知られている。Lennard-Jonesポテンシャルは、粒子間距離の関数として次のように表される⁽³⁾。

$$\phi(r) = 4\epsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right]$$

ここで ϕ はポテンシャルエネルギー、 r は粒子間距離、 ϵ はポテンシャル深さ、 σ は粒子径である。パラメータはアルゴンの値である $\epsilon = 1.65 \times 10^{-21}$ J、 $\sigma = 3.41 \times 10^{-10}$ m、質量は $m = 6.69 \times 10^{-26}$ kgを用いた。時間積分は速度ベルレ法で行い、時間刻み幅は $dt = 1.084 \times 10^{-14}$ sとした。

2.2 ラバルノズル

凝集流れの例として、ラバルノズルによる超音速流を解析対象とした。これは収束拡大ノズルとも呼ばれ、断面積が流入口から喉部へと収縮し、そこから流出口へと再度拡大する形状を持つ。流体は断面積の収束に伴って膨張・加速され、喉部で音速に達し、そこから拡大によってさらに膨張・加速され超音速流となる。ノズルの断面積が流れ方向に1次元のかつ滑らかに変化し、流体が理想気体、非粘性、等エントロピーであれば、圧力、温度、マッハ数といった流体特性は断面積の1次元関数として表されることが知られている⁽⁴⁾。さらに、流入条件によってはノズル内で流体が湿り蒸気となり、液滴が発生することが実験やCFDで広く確かめられている⁽²⁾。本研究では、MD法で得られた流れ場を理論値と比較することでMD法の計算結果の妥当性を検証する。また、流入条件を調整することで、ノズル内に凝集が発生するかを観察する。

図1に、ノズルの概略を示す。断面が円形のラバルノズルの一端に熱浴を設置し、もう一端は自由流出境界とする。熱浴の温度と圧力を一定の値に制御することで流入境界条件を与え、流れはノズル両端の圧力差によって駆動される。ラバルノズルをMD法で再現し、かつ計算負荷を軽減すべく、本研究では3種類の要素技術を開発した。すなわち圧力制御による熱浴⁽⁵⁾、SDFによるノズル壁⁽⁶⁾、軸対称境界条件による

計算領域の分割⁽⁶⁾である。要素技術の概要を次に示す。

2.3 圧力制御

MD法における圧力制御は計算領域の容積を変更する方法が一般的だが⁽³⁾、本研究では熱浴の容積は一定としたい。そこで、熱浴内に粒子を追加または削除することで圧力を一定に保つ手法を開発した。追加または削除する粒子数は、圧力の現在値と目標値の比率から決定される。追加する粒子の座標はランダムに選択するが、そのままではすでに存在する粒子との距離が近すぎ、通常は発生しない大きな斥力によって計算が破綻する可能性がある。これを回避すべく、粒子を追加する前に目標座標と近傍粒子位置間のポテンシャルエネルギーを計算し、一定の閾値(ここでは $\phi_{threshold} = \phi(1.0\sigma)$ とした)を超える粒子がある場合は別の座標候補を選定する。この処理は、ポテンシャルが閾値を超えない座標候補が見つかるまで繰り返される。温度制御には速度スケール法を用いた。

2.4 SDFによるノズル壁

一般にMD法で剛体と流体の連成を扱う際には、剛体粒子をバネ状のポテンシャルでつなぎ、剛体粒子と流体粒子の相互作用を計算する。ミクロスケール解析においては、この手法は剛体の結晶構造を再現でき、さらに流体との相互作用を熱伝導なども含め正確に計算できるが、粒子数の増大による計算負荷が大きい。一方、本研究はRMDによるマクロスケール解析を視野に入れていることから、剛体の結晶構造を考慮する必要はない。これらの理由から、本研究ではノズル壁の表現にSDFを用い、計算負荷の軽減を行った。SDFとは剛体までの最短距離を値として持つスカラー場で、粒子計算への適用は分散要素法で提唱された⁽⁷⁾。計算領域を直交格子に区切り、各格子点から剛体までの最短距離を事前に計算しておく。粒子-壁間の距離は、粒子が所属するセルの格子点の値から内挿することで算出される。粒子-壁間の相互作用にはLennard-Jonesポテンシャルの斥力項のみを適用し、壁表面のスリップ条件を再現した。これはノズル壁から流体への作用を小さく抑えることで、流れ場を非粘性に近似させることを目的とする。

2.5 軸対称境界条件

ノズル形状は流れ方向に対して軸対称であり、また断面積も緩やかに変化することから、流れ場も同様に軸対称で、強

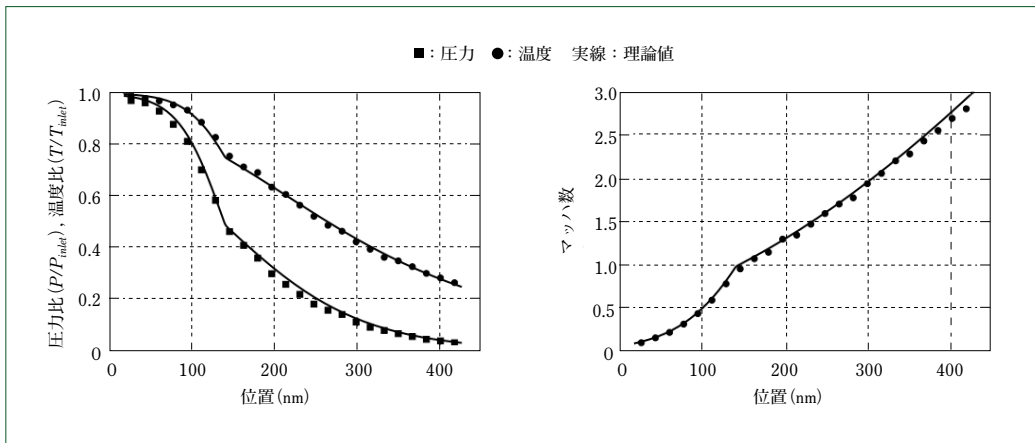


図2 条件1の流れ場分布
Flow profiles of case 1

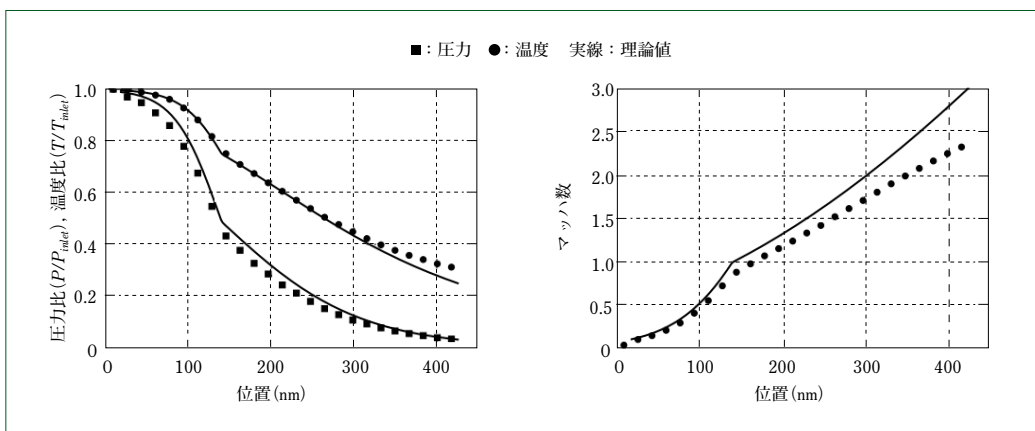


図3 条件2の流れ場分布
Flow profiles of case 2

い旋回流はないものと仮定できる。そこで軸対称境界条件を実装し、計算負荷を軽減した。計算領域は円筒軸に沿って分割される。分割された面は周期境界として機能し、境界面から流出した粒子は軸対称の位置から再び計算領域に戻される。また、軸対称位置にある粒子やノズル壁との粒子間相互作用も計算される。分割する大きさは任意だが、分割した領域が小さすぎると実際に領域に存在する粒子数も少なくなり十分な統計量が計算できないことから、本研究では4分割にとどめた。ラバルノズルの計算に適用した場合、全周モデルと4分割モデルの流れ場にほぼ差異が見られないことは検証済みである。

2.6 粒子クラスター

MD法による凝集現象の解析には多くの先行研究があるが、その研究のほとんどで複数の粒子が相互作用によって結合したクラスターの追跡および観察を行っている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。粒子間結合の定義もいくつか提唱されているが、本研究では粒子間距離がある一定の値以下となる粒子の集合をクラスターとして定義する手法を用い、この距離を 1.5σ と設定した⁽¹⁰⁾。注意する点として、粒子間距離によるクラスターの検知は、あくまである瞬間の位置をもとにしたもので、個々のクラスターの成長や分

裂・融合といった動的な変化については追跡や考慮がされていない。このことから偶然近くに存在する粒子をクラスターと認識する可能性がある(特に、密度の高い条件において可能性が高い)。そこで、今回は粒子数が5個以上のもののみをクラスターとみなし、またクラスター数やサイズのアンサンブル平均を取ることで、この誤差を抑えることとした。

3 解析結果と考察

3.1 解析条件

表1に、解析に用いた2つの条件を示す。条件1は、ノズルを通してアルゴンが気体の領域にとどまるもので、連続体近似との比較による検証を行う。条件2は、ノズル下流部においてアルゴンが気液混相状態となるもので、凝集現象の観察を試みる。

それぞれの条件において、まず5.0nsまで計算して定常状態とし、続く2.0nsで流れ場のアンサンブル平均を取った。ノズルを軸方向に24の小領域に分割し、その内部で温度や圧力を計算することで流れ場の分布を算出した。

3.2 解析結果：非凝集流れ

図2に、条件1の圧力および温度とマッハ数の流れ方向に

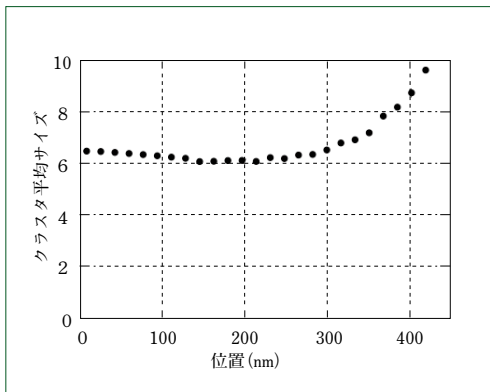


図4 クラスタ平均サイズ分布
Distribution of average size of clusters

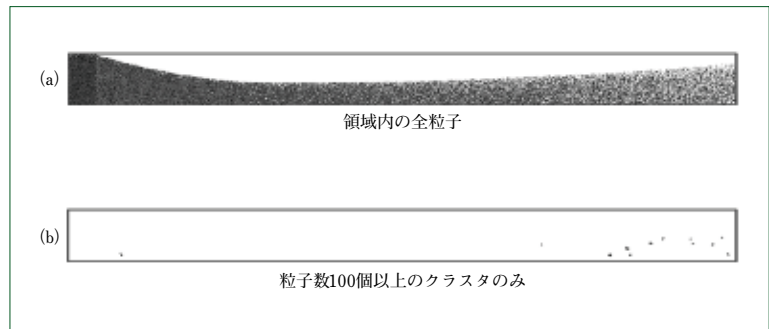


図5 ノズル流れのスナップショット
Snapshots of nozzle flow

対する分布を示す。圧力と温度は流入条件でそれぞれ規格化してある。黒点は本研究の計算結果、実線は等エントロピー膨張による理論値⁽⁴⁾を表す。音速は静温度より $c = \sqrt{\gamma RT}$ によって求め、比熱比と気体定数にはアルゴンの物性値である $\gamma = 1.67$ と $R = 208.0$ をそれぞれ用いた。マッハ数、圧力、温度のいずれも理論値と高い精度で一致しており、MD法によって超音速流を適切に再現できることが確認された。

3.3 解析結果：凝集流れ

図3に、条件2の凝集流れの計算結果を示す。圧力や温度は理論値と比較的精度良く一致しているが、特にノズル下流域の温度に、条件1よりも大きな乖離が見られる。一方、マッハ数の理論値との乖離は下流に行くほど大きくなる傾向が見られた。理論と一致しない理由として、凝集流れは理論式の前提条件である理想気体ではないことがまず考えられる。また、粒子クラスタを伴う流れ場は、局所的にも非一様性が高く、統計的に正確な値が求めにくいという点もあげられる。

図4に、条件2の平均クラスタサイズ(クラスタを構成する粒子の数)の分布を示す。ノズル出口に向かうにつれ、クラスタサイズが増加していることが確認できる。図5(a)は流れ全体の、図5(b)は同じ瞬間の粒子数100以上のクラスタのみを表示したスナップショットである。同様に、ノズル出口近傍でより大きなクラスタの存在が観察される。ノズル下流になるほど粒子密度が低いことを考慮すれば、こういった大きなクラスタの存在は偶然生じたものではなく粒子同士が相互作用によって結合している、すなわち凝集が発生していることを示している。

ラバルノズルを用いた凝集実験では、凝集の発生する領域で温度と圧力が不連続的に上昇することが知られている。これは凝集によって潜熱が場に放出されることで生じる現象で、CFDでも使用する蒸気モデルが適切であれば、同様の現象が再現される⁽²⁾。しかしながら本研究では、図3に見られるとおり温度と圧力の不連続上昇は確認されなかった。この原因として考えられるのはスケールの違いである。一般にラバルノズルの実験やCFD解析はマクロスケールを対象に行われるが、MD法を用いた本研究では計算領域がnmのオーダーである。このことから、潜熱の影響が十分に表れるだけの時間的・空間的な幅がなかったものと推測される。

4 むすび

- (1) 非平衡MD法による超音速流と凝集流れの再現および解析が可能であることが確認された。
- (2) 長さスケールの違いにより、潜熱の流れ場への影響は確認されなかった。
- (3) RMD法の適用により、気液相転移を伴う流れ場のマクロスケール解析が可能となる。
- (4) 蒸気タービン低圧段の湿り蒸気解析といった、相転移を伴う困難な問題への展開を目指す。

(参考文献)

- (1) 市嶋大路, シミュレーション方法 シミュレーションプログラム 及びシミュレーション装置, 特開2016-218767.
- (2) J.Starzmam, Results of the international wet steam modelling project, Wet Steam Conference, 2016.
- (3) J.M.Thijssen, Computational Physics, Cambridge University Press, 2nd edition, 2007.
- (4) J.D.Anderson, Jr., Fundamentals of Aerodynamics, McGraw-Hill, 4th edition, 2007.
- (5) 熱浴の圧力制御方法, 特願2017-165035.
- (6) 円筒型周期境界と符号付距離関数による流体/剛体連成解析手法, 特願2017-204856.
- (7) M.Sakai, How should the discrete element method be applied in industrial systems? : A review, KONA Powder and Particle Journal, 33, 2016.
- (8) K.Yasuoka and M.Matsumoto, Molecular dynamics of homogeneous nucleation in the vapor phase. I. Lennard-Jones fluid, J. of Chemical Physics, 109 (19), 1998.
- (9) R.Angelil, J. Diemand, K.K.Tanaka, and H.Tanaka, Properties of liquid clusters in large-scale molecular dynamics nucleation simulations, J. of Chemical Physics, 140, 074303, 2014.
- (10) F.H.Stillinger Jr., Rigorous basis of the Frankel-band theory of association equilibrium, J. of Chemical Physics, 38 (1486), 1963.

STAF (Steel Tube Air Forming) プロセスの開発

Development of STAF (Steel Tube Air Forming) Process

●石塚正之* 清水慧**
Masayuki ISHIZUKA Satoshi SHIMIZU



STAF試作機
STAF prototype machine

自動車業界において燃費向上およびCO₂ガス削減は重要な課題の一つとなっている。これらの達成には車両の軽量化が有効な手段であることから、その検討および実施がなされている。車両の軽量化を実現するに当たり、衝突に対する安全性を兼ね備えていることも必要であり、それを踏まえた開発が求められている。

本報では車両の軽量化と衝突安全性の課題を解決すべく、高強度・高剛性の自動車部品を形成することができるSTAF (Steel Tube Air Forming) プロセスについて述べる。STAFプロセスは、直接通電による急速加熱とダイクエンチングが可能なガスブロー成形により、閉断面を連続的に変化させた1500MPa級の引張強度を有する部材の成形技術である。

In the automotive industry, improving fuel efficiency and reducing CO₂ gas are one of the important issues. Since lightweight is an effective means for the purposes, it has been developed and carried out. It is necessary to realize the lightweight of automobile parts with safety against collision.

In this report, a novel forming technology, STAF (Steel Tube Air Forming) process, will be introduced. The process enables to form TS (Tensile Strength) -1500MPa grade material into a tubular component with a continuously varying closed cross-section by using the current rapid resistance heating, the gas-blow forming, and the die-quenching in a press mold. STAF process is expected to form automobile parts with high strength and rigidity in one-pack process.

1 まえがき

自動車業界における燃費向上およびCO₂ガス排出量の削減は、近年における重要課題の一つとしてあげられる。自動車の軽量化が必須となるなか、衝突に対する安全性を確保しながら軽量化を実現すべく、自動車分野の各社においてさまざまな取組みがなされている。その有効な手段として、従来のスチールからアルミニウムなどの異種材料への置換とマルチマテリアル化による部材軽量化が検討され実施されている。また、構造材としての観点から高強度と高剛性を兼ね備えた部材を得ることができれば、現状より素材の厚さを薄くすることが可能となり、部材の断面を小さくすることによる軽量

化も期待できる。

こうした状況のなか、当社では自動車の骨格部品の軽量化に着目し、材料の高強度および高剛性を同時に確保する構造部材とその製造方法を検討してきた。図1に、当社における開発のコンセプトを示す。図1には強度と剛性との関係を示し、各製法による断面を併記している。自動車部材の材料自体の強度は、現状技術ではホットプレスプロセスの一つであるホットスタンピングプロセスを用いることで、1500～1800MPaを確保できている。しかしながらホットスタンピングプロセスによる自動車部材の成形は、通常、板材を目的形状とした後にスポット溶接などにて2部品を接合して部品としている。このことから、閉断面構造を有する部品と比較

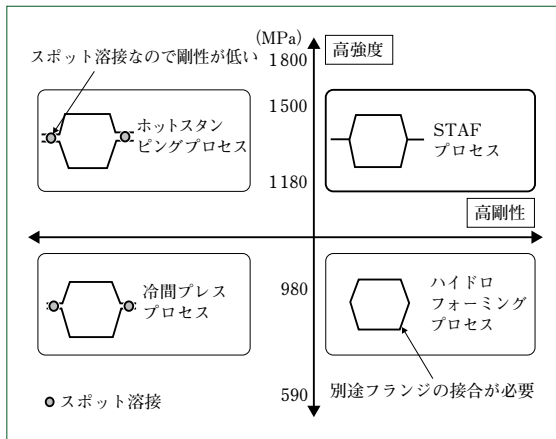


図1 開発のコンセプト
Concept for STAF development

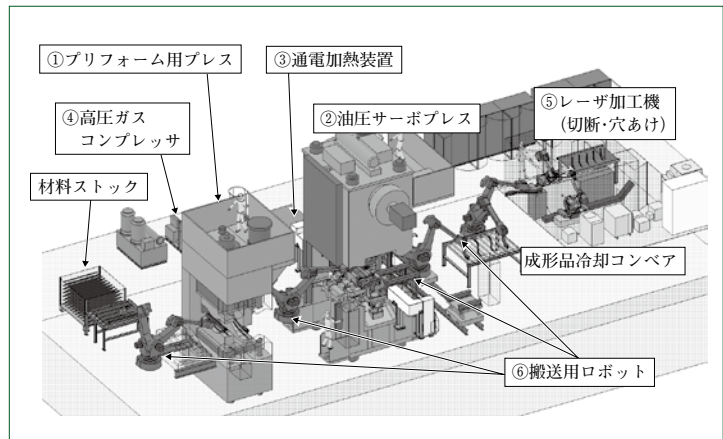


図2 STAF製造装置概要
Overview of STAF product machine

して剛性は低くなることが予想される。一方、閉断面構造を得ることができるハイドロフォーミングプロセスは、パイプ内部に高圧媒体を注入し目的形状に成形する。これにより高い剛性を得られるが、高圧媒体での成形には限界があるので材料自体の強度は1200MPa程度までの範囲であり、それ以上の強度を得るのは困難となっている。そこで当社は、ホットスタンピングプロセスによる1500MPaに近い材料自体の引張強度を有し、ハイドロフォームプロセスによる閉断面構造に加え、剛性を高めることに寄与するフランジを有する部材を得ることが可能となるプロセスの開発に取り組むこととした。開発したのは、図1におけるSTAFプロセスで、熱間ブロー成形技術の一つである。

本報では新規製造プロセスであるSTAF設備について報告するとともに、STAFプロセスにより作製した部材の評価結果について述べる。

2 装置構成

2.1 STAF 製造プロセスの構成

図2に、STAF製造装置概要を示す。STAFプロセスの主要装置は、

- ①プリフォーム用プレス
- ②STAF成形用の油圧サーボプレス
- ③通電加熱装置
- ④ガスブロー用の高圧ガスコンプレッサ
- ⑤切断および穴あけ用のレーザー加工機
- ⑥搬送用ロボット

から構成されている。なお、①は、必要とする形状によりバンディング装置のような代替装置でもよく、あるいは不要となることもある。

本研究ではステップを踏んで開発を進めた。まず、第1ステップとしてSTAFプロセスを実証すべく、約600mmの製品長さが確保できるテスト機を開発した。テスト機は②、③、④の装置で構成される。テスト機により高強度・高剛性の部材が確保できることを実証した後、第2ステップとして約1600mmの製品長さが確保できる試作機を開発した。表1に試作機の主仕様を、表2に試作機で成形可能な形状を示す。

試作機は①以外の②～⑤の装置より構成され、実サイズの自動車骨格部材を作製することが可能となる。

STAFプロセスの装置における特長は、加熱用の炉が不要であることから、加熱炉を必要とするプロセスに比べてスペースを大幅に削減できることである。一方、加熱炉を使用せずに焼入れし、高強度部材を得る報告はすでになされている。たとえば、Mn-B鋼の板材を通電加熱しホットスタンピングするプロセス⁽¹⁾、あるいはMn-B鋼のパイプを高周波加熱しガスブロー成形するプロセス⁽²⁾があげられる。また、アルミの鋼管をSTAFプロセスと同様に通電加熱しガスブロー成形する製法⁽³⁾についての報告もなされている。これらの報告はスチールパイプを通電加熱してガスブロー成形するSTAFプロセスとは異なる。また、STAFプロセスは熱間ブロー成形であることから大型プレスは必要なく、ブロー圧に耐え得る1000tf程度のプレス能力を有するプレス装置で十分であることも特長の一つである。

2.2 構成装置に要求される性能

STAFプロセスにおける構成装置である、前述の①～⑥について、それぞれ必要とされる性能について示す。①のプリフォーム用のプレスは、STAF成形における金型形状に合わせて素材となるパイプの長手方向に湾曲させる、あるいは断面形状を真円ではなく楕円などにフォーミングさせて、その後のSTAF成形をしやすいことを目的としている。このことから大型プレスは必要なく、200tf程度のプレスで十分である。②のSTAF成形用の油圧プレスは、通電加熱および高圧ガスブローと連動させて、金型の位置を精度良く停止させることが求められる。これによりサーボプレスが必要となるが、鍛造プレスのような大型のプレスは必要としない。STAF試作機においては、表2の形状を対象に、パイプ内のブロー圧に耐え、また、金型の途中停止位置制御が可能な800tfの油圧サーボプレスを用いている。③の通電加熱装置は、5秒前後で素材となるパイプを約900℃まで加熱する条件で検討し、パイプの長さ、外径および肉厚に応じた通電電流の選定が必要であり、それにより電源性能が決定される。STAF試作機においては、自動車骨格パーツのほとんどの部材の成形が可能となるよう、表2に示すように、素材長さ約

表1 STAF試作機仕様
Specifications of STAF prototype machine

能力(tf)	800
ストローク(mm)	100(加圧領域)
	600(アプローチ)
デーライト(mm)	1740
ベッド上面寸法(mm)	L1900×W1600
フットプリント(mm)	L4950×W4800×H7500
重量(t)	85
通電電流(kA)	18
高圧ガス発生能力(NL/min)	8770

表2 STAF試作機における成形可能な形状
Formable shape in STAF prototype machine

最大パイプ外径(mm)	150
最小パイプ外径(mm)	50
製品全長(mm)	～約1600 (パイプ径150mmのときは最大1500mm)
パイプ(素材)長(mm)	750～1930
製品肉厚(mm)	1.0～2.0
最小曲率半径(mm)	150
最小曲がり角度(°)	120～180
材質	Mn-B鋼

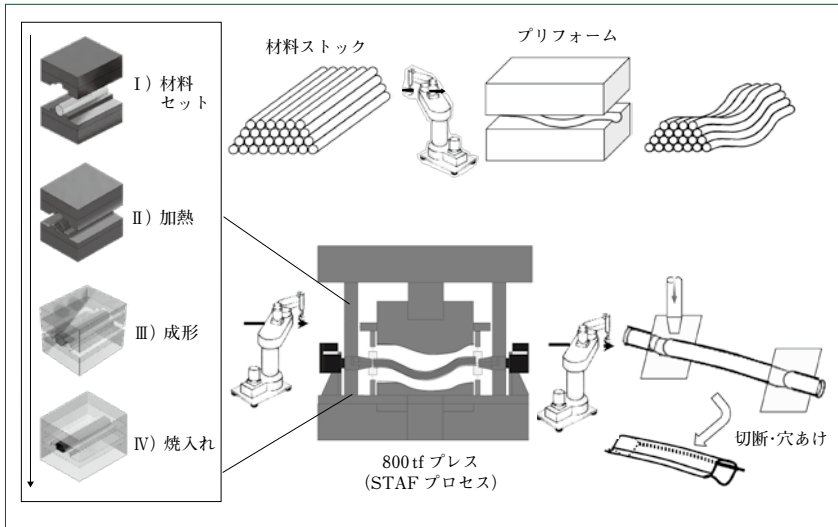


図3 STAFプロセスによる成形の概要
Forming outline of STAF process

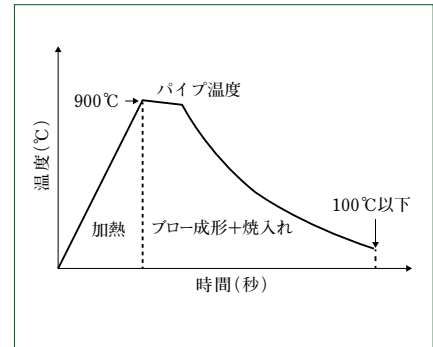


図4 STAFプロセスのサイクルタイム
Cycle time for STAF process

1930mm, 外径150mmのパイプまでを対象として、それに応じた電源容量とした。④のガスブロー用の高圧ガスコンプレッサは、約900℃まで加熱したパイプ内に高圧ガスを供給するのに必要であり、最大圧30MPaまで昇圧可能な仕様とした。⑤切断および穴あけ用のレーザー加工機は、STAF成形後の部品の両端切断および穴あけ用に設置している。⑥搬送用のロボットは、各装置間における搬送に用いる。

2.3 STAFプロセスによる成形概略

STAFプロセスは、加熱から焼入れまでを金型内ですべて完了するワンパック加工が可能であることを特長としている。図3に、STAFプロセスによる成形の概要を示す。ホットプレスプロセスなどの従来の焼入れを伴うプロセスでは、対象素材を炉で加熱した後、金型にセットし成形・焼入れを行うのが一般的であるが、STAFプロセスでは、まず、I) 金型と素材となるパイプとが接触しないように金型内にセットし、II) 金型内で通電によりパイプを所定温度まで加熱した後、通電を完了させる。次に、III) 完全に金型を閉じない半開きの状態で瞬時に高圧エアをパイプ内に注入してフランジを張り出させる。その後、金型を完全に閉じると同時に、フランジを張り出させたときよりもさらに高圧なエアを注入して拡管させ、金型に素材を密着させることで目的形状に成形する。IV) 金型を閉めた状態で保持して金型冷却により焼入れし、最終部品を得る。このI)～IV)の各工程により一連のSTAF

プロセスが完了する。

図4に、STAFプロセスにおける一連のサイクルタイムを示す。通電加熱を開始してから、ブロー成形と焼入れを経て、トータルで30秒前後のサイクルタイムを目標としている。生産性をさらに上げるには、部材の複数個成形も考えられ、今後の課題となっている。

3 STAF成形部材

第1ステップのSTAFテスト機により成形した部材の一例を図5に示す。成形には、長さ814mm, 外径60.5mm, 肉厚1.6mmおよび1.2mmのMn-B鋼パイプを用いた。得られた成形部材の両端を切断して約400mmの長さにした後に塗装した。

図5の上段は全体写真およびその断面写真、下段は部材の長手方向中央部で切断した断面写真である。上段の全体写真は、長手方向がストレートの部材および湾曲した部材、下段の断面写真は、両サイドに角度を付けないフランジを設けた部材、角度を付けたフランジを設けた部材、片側のみにフランジを設けた部材に加え、成形前のパイプについて示している。得られた成形部材は、すべて閉断面構造となっており、ビッカース硬さで均一にHV450以上、引張強度に換算して1500MPa以上という結果が得られた。なお、これら形状の異なる成形部材は、通電加熱用電極および高圧ガス供給部にすべて同一部品を用い、金型のみを変更して成形している。

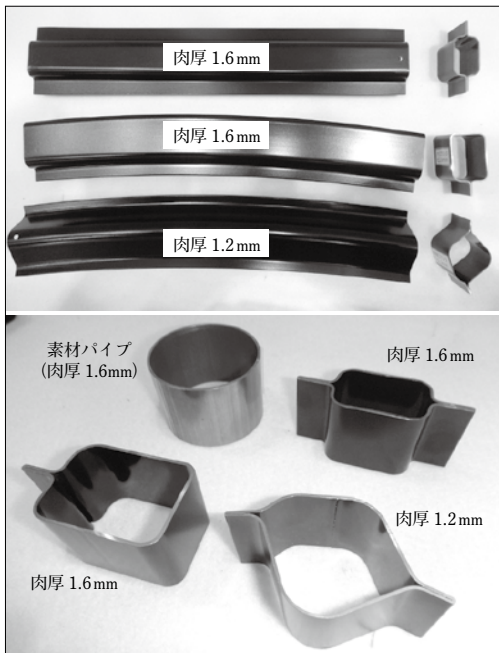


図5 STAFテスト機による成形部材
Parts fabricated by STAF test machine

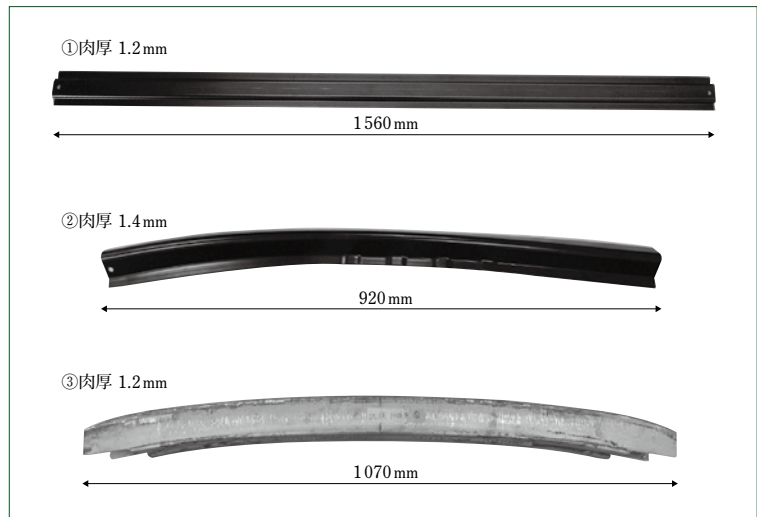


図6 STAF試作機による成形部材
Parts fabricated by STAF prototype machine

4 STAF試作機

代表図(P23写真)に示されるSTAF試作機は、2018年9月に完成した。

現在、試作機では実サイズの自動車骨格を模擬した部材を製作し、その性能評価を行っている。図6に、STAF試作機により作製した部材を示す。①は基本形状であり、長手方向は曲がりがなくストレートで、肉厚は1.2mm、長さは1560mmである。②はAピラーを模擬した形状であり、長手方向に最小半径で1500mmに湾曲させており、肉厚は1.4mm、長さは920mmである。断面形状は、両サイドにフランジを設けているが角度を付けており、長手方向に断面形状を徐々に変化させている。③はバンパービームを模擬した形状であり、長手方向に最小半径で約3000mmに湾曲させており、肉厚は1.2mmで長手方向に徐々に断面形状を変化させている。STAF試作機にて作製した部材は、STAFテスト機にて作製した部材と同様にビッカース硬さで均一にHV450以上、引張強度に換算して1500MPa以上という結果となった。

5 むすび

- (1) 自動車の燃費向上およびCO₂ガス排出量の削減を目的に、安全性を確保した自動車の軽量化が期待できるSTAFプロセスにおいて、各構成装置に必要とされる性能の検討を行った。
- (2) STAFプロセスを実証すべく構成装置のなかで最低限必要なプレス装置、通電加熱装置、高圧ガスコンプレッサおよびタンクユニットを準備して第1ステップとし、テスト機を開発して部材作製と評価を行った。テスト機により作製した部材は、長手方向に連続した閉断面を有し、ビッカース硬さより換算した引張強度は1500MPa

以上であることから、高強度・高剛性の部材が得られる可能性を示した。

- (3) 第2ステップでは、テスト機をスケールアップして、自動車部材の実機サイズが製作可能な試作機を開発した。STAF試作機では、素材長さ約1930mm、外径150mmのパイプまでを対象として、実際に基本形状成形体、Aピラー模擬成形体、バンパービーム模擬成形体を作製して評価した。
- (4) その評価結果は、テスト機による成形体と同様に、ビッカース硬さで均一にHV450以上、引張強度に換算して1500MPa以上となった。

今後は製造プロセスの開発を継続して進め、自動車骨格部材により近い形状、長さの作製実証を行い、採用されるよう図っていききたい。

(参考文献)

- (1) 牧清二郎, 濱本篤, 森謙一郎: 通電加熱プレスクエンチした高張力鋼板の硬さおよび引張特性, 材料試験技術, 53-1(2008), 20-24.
- (2) N.Pierschel, A.Paul, K.Silbermann F.Schieck and W.Drossel, Theoretical and experimental investigations on press hardening of tubes in hot metal gas forming, Proceedings of 4th International conference, Hot sheet metal forming of high-performance steel, p.397-406 (2013).
- (3) T.Maeno, K.Mori, K.Adachi, Gas forming of ultra-high strength steel hollow part using air filled into sealed tube and resistance heating, Journal of Materials Processing Technology 214 (2014) 97-105.

※「STAF」は、住友重機械工業株式会社の登録商標です。

住友重機械技報第196号発行に当たり

住友重機械技報第196号をお届け致します。

本誌は、当社が常々ご指導いただいている方々へ、最近の新製品、新技術をご紹介申し上げ、より一層のご理解とご協力をいただくよう編集したものです。

本誌の内容につきましては、さらに充実するよう努めたいと考えますが、なにとぞご意見賜りたく、今後ともよろしくご支援下さるよう、お願い申し上げます。

なお、貴組織名、ご担当部署などについては、変更がございましたら裏面の用紙にご記入のうえ、FAXでお知らせいただきたくお願い申し上げます。また、読後感や不備な点を簡単に裏面用紙にご記入願えれば幸いに存じます。

2018年10月

〒141-6025 東京都品川区大崎2丁目1番1号 (ThinkPark Tower)

住友重機械工業株式会社

技術本部 技報編集事務局

(宛先) _____ 住友重機械工業(株) 技術本部 技報編集事務局 行 FAX 横須賀 046 - 869 - 2358	(発信元) _____ 貴組織名 担当部署 氏 名 TEL No. FAX No.
--	--

住友重機械技報第196号の送付先の確認と読后感などの件

送 付 先 変 更	(旧送付先) 送付番号 _____ 組織名称 _____ 担当部署 _____ 所在地 _____ 〒 _____	➔	(新送付先) 送付番号 _____ 組織名称 _____ 担当部署 _____ 所在地 _____ 〒 _____
----------------------------------	--	----------	--

新 規 送 付 先	新しい部署ができた場合ご記入下さい。 組織名称 _____ 担当部署 _____ 所在地 _____ 〒 _____ <div style="text-align: right; margin-top: 10px;">必要部数 _____ 部</div>
----------------------------------	---

本 号 の 読 後 感 に つ い て	1. 本号で、一番関心を持たれた記事は。 2. 本号を読まれたご感想をお知らせ下さい。(○印でご記入下さい。) 1 興味深かった 2 特に興味なし その理由をお聞かせ下さい。
--	---

キ
リ
ト
リ
線



住友重機械工業株式会社
Sumitomo Heavy Industries, Ltd.

